



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Reducción del flúor en el concentrado de cobre
controlando el %masspull aplicando la metodología six
sigma**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Bryan Jesús SÁNCHEZ HIPÓLITO

ASESOR

Ing. Ángel AZAÑERO ORTIZ

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Sánchez, B. (2021). *Reducción del flúor en el concentrado de cobre controlando el %masspull aplicando la metodología six sigma*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Bryan Jesus Sanchez Hipolito
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47718003
URL de ORCID	“__”
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Angel Azañero Ortiz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09456006
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0872-4551
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Manuel Leonardo Cabrera Sandoval
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07770007
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Rios
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425

Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica.
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.060433326379712 Longitud: -77.0842091371485
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2018 - 2020
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02 Estadísticas, Probabilidad https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.01.03



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia»

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO

Mediante la plataforma virtual de Google Meet la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 23, del mes de septiembre del 2021 siendo las 18:14 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador.

Reunidos virtualmente para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS de Don: BRYAN JESÚS SÁNCHEZ HIPÓLITO Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentó la Tesis Titulada: «Reducción del flúor en el concentrado de cobre controlando el %masspull aplicando la metodología six sigma» para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: METALÚRGICO.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

El Jurado procedió a la calificación según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....DIECISÉIS (16).....

Habiendo concluido la Sustentación Tesis por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO, a Don: Bryan Jesús Sánchez Hipólito.

Siendo las 20:15 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 23 de septiembre de 2021

Ing MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL
Miembro Presidente

Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Miembro

Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27.09.2021 20:44:37 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

Datos de la plataforma virtual institucional del Acto de Sustentación:

<https://meet.google.com/etc-vvhy-tka>

Grabación archivada en <https://drive.google.com/file/d/11e1XsBh7owEJYkRX1FC9nK9gDa1rk3C9/view>

DEDICATORIA

La presente tesis va dedicada a mis padres Nérida Hipólito y Carlos Sánchez quienes me incentivaron a seguir creciendo como profesional, enseñaron a superarme, apoyaron en todo momento y brindaron consejos para ser la persona que soy actualmente.

A mi hermana Karen Sánchez quien es mi ejemplo a seguir como persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi querida Universidad Nacional Mayor de San Marcos por recibirme en sus aulas y a mis profesores quienes con sus enseñanzas y experiencias lograron formarme como profesional.

Agradezco a mi asesor de tesis Ing. Ángel Azañero por el tiempo brindado para la revisión de la presente tesis.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	7
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
Capítulo I:	12
1.1. Introducción	12
1.2. Antecedentes	13
1.3. Planteamiento del problema	15
1.4. Hipótesis	16
1.5. Objetivos	16
1.5.1. Objetivos Generales.	16
1.5.2. Objetivos Específicos.	16
1.6. Justificación	16
1.7. Limitaciones	16
Capítulo II: Marco Teórico	18
2.1. Calidad	18
2.2. Gestión de Calidad	19
2.3. Calidad Total	19
2.4. Proceso	20
2.5. Introducción al Six Sigma	21
2.6. Metodología Six Sigma	21
2.7. Fases del Six Sigma	22
2.7.1. Fase Definir.	23
2.7.2. Fase Medir.	25

2.7.3.	Fase Analizar.....	27
2.7.4.	Fase Mejorar.....	30
2.7.5.	Fase Controlar.	31
Capítulo III: Caracterización del Mineral.....		32
3.1.	Análisis Químico	32
3.2.	Caracterización Mineralógica.....	32
3.2.1.	Distribución Modal.....	32
Capítulo IV: Aplicación del Six Sigma		36
4.1.	Fase Definir	36
4.1.1.	Mapa de Procesos – Primer Nivel.	36
4.1.2.	Identificación del Cliente.	37
4.1.3.	Requerimientos del Cliente.	37
4.1.4.	Diagrama SIPOC.....	39
4.1.5.	Identificación de la métrica	42
4.1.6.	Diagrama Crítico.	43
4.2.	Fase Medir	43
4.2.1.	Diagrama de Ishikawa.	44
4.2.2.	Mapa de Procesos – Segundo Nivel.	47
4.2.3.	FMEA/ANFE.	48
4.2.4.	Validación del Sistema de Medición.....	51
4.2.5.	Capacidad del Proceso.....	54
4.3.	Fase Analizar	58
4.4.	Fase Mejorar	71
4.5.	Fase Controlar.....	76
Capítulo V: Discusión de Resultados		80

Capítulo VI: Conclusiones.....	82
Capítulo VII: Recomendaciones.....	83
Capitulo VIII: Referencias Bibliográficas	84
ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Indicadores de la competitividad y de la satisfacción del cliente.	19
Figura 2. Una operación de negocios consta de insumos, valor agregado, producto, venta y servicio postventa.	20
Figura 3. Herramientas utilizadas en la metodología Six Sigma.	22
Figura 4. Estabilidad y capacidad de un proceso.	27
Figura 5. Patrones de correlación.	29
Figura 6. Composición mineralógica de muestras individuales.	33
Figura 7. Composición mineralógica promedio.	33
Figura 8. Distribución modal por grupos.	34
Figura 9. Identificación de minerales aportantes de cobre.	35
Figura 10. Identificación de minerales de flúor.	35
Figura 11. Diagrama de Bloques de Procesos – Primer Nivel.	37
Figura 12. Matriz Causa – Efecto.	38
Figura 13. Diagrama SIPOC.	39
Figura 14. Diagrama del flujo del proceso.	41
Figura 15. Gráfica de regresión Flúor vs %masspull.	42
Figura 16. Diagrama Crítico.	43
Figura 17. Diagrama de Ishikawa.	46
Figura 18. Mapa de Procesos – Segundo Nivel.	47
Figura 19. Consolidado FMEA/ANFE.	49
Figura 20. Informe estadístico R&R del %masspull.	52
Figura 21. Informe gráfico R&R del %masspull.	54
Figura 22. Resumen gráfico del %masspull.	55

Figura 23. Gráfica de probabilidad de la normalidad del %masspull.....	56
Figura 24. Gráfica \bar{X} -R del %masspull.....	57
Figura 25. Informe de capacidad del proceso del %masspull	58
Figura 26. Informe estadístico de correlación entre Concentrado Cu vs %masspull	59
Figura 27. Informe estadístico de la regresión entre Concentrado Cu vs %masspull	60
Figura 28. Gráfica de regresión entre Concentrado Cu vs %masspull	61
Figura 29. Gráfica de residuos de la regresión entre Concentrado Cu vs %masspull	61
Figura 30. Informe estadístico de correlación entre concentrado talco vs %masspull	62
Figura 31. Informe estadístico de la regresión entre concentrado talco vs %masspull	63
Figura 32. Gráfica de regresión entre Concentrado Talco vs %masspull.....	64
Figura 33. Gráfica de residuos de la regresión entre Concentrado Talco vs %masspull.....	64
Figura 34. Gráfica de efectos principales del %sólidos y flujo de alimentación para el %masspull.....	66
Figura 35. Gráfica multivariable del %sólidos y flujo de alimentación para el %masspull.	67
Figura 36. Gráfica de cajas de los perfiles de las celdas de flotación.	68
Figura 37. Gráfica de cajas de %abertura de válvula de aire de las celdas de flotación.	69
Figura 38. Gráfica de efectos principales de la relación Perfil/Abertura Válvula de aire.	70
Figura 39. Gráfica de efectos principales del ORP.....	71
Figura 40. Gráfica de cubos del %masspull	73
Figura 41. Gráfica de efectos principales del %masspull.....	74
Figura 42. Diagrama de Pareto de %sólidos y flujo de alimentación.....	74
Figura 43. Informe estadístico del DOE	75
Figura 44. Gráfica de control de %sólidos y flujo de alimentación vs %masspull	76
Figura 45. Informe de diagnóstico de comparación de la capacidad antes/después para %masspull.....	77

Figura 46. Informe de resumen de comparación de la capacidad antes/después para %masspull.....	78
Figura 47. Informe de desempeño del proceso de comparación de la capacidad antes/después para %masspull.....	79
Figura 48. Flúor en el concentrado de cobre antes/después	80
Figura 49. Grado de cobre en el concentrado de cobre antes/después	81
Figura 50. %Recuperación Cu del circuito antes/después.	81
Tabla 1. Pautas Generales para diseñar un experimento	31
Tabla 2. Análisis químico del alimento al circuito moly	32
Tabla 3. Criterios para analizar un estudio R&R.....	53
Tabla 4. Evaluación parámetros rougher	65
Tabla 5. Valores mínimos y máximos para el DOE	71
Tabla 6. Resultados del DOE para %Sólidos y flujo de alimentación	72

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en una compañía minera cuya planta concentradora se dedica a la producción de concentrado de cobre, pero debido a su contenido de flúor era penalizado económicamente.

El flúor en el concentrado era muy variable, se obtenía un contenido promedio de 813.08ppm con un %Cu promedio de 21.22%.; sin embargo; la compañía minera requería que el concentrado de cobre tenga un contenido de flúor menor a 700ppm. Por otro lado, se demostró que obteniendo un %masspull superior a 11% en el proceso el contenido de flúor disminuía. Debido a esto, se propuso implementar la metodología Six Sigma como plan de mejora continua teniendo como métrica de referencia al %masspull. La metodología se desarrolló en 5 fases las cuales son las siguientes: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (DMAMC). En el desarrollo de la metodología se determinó que la causa principal que afectaba el %masspull era el %sólidos de la etapa rougher.

Implementada la metodología Six Sigma, se concluyó que el concentrado de cobre tuvo un contenido de flúor menos variable y con un promedio de 555.384ppm y un %Cu de 21.435, reduciéndose en 68% los casos donde el contenido de flúor era mayor a 700ppm.

ABSTRACT

The research work developed on this occasion was carried out in a mining company whose concentrator plant was dedicated to the production of copper concentrate, but due to its fluorine content, its copper concentrate was economically penalized.

The fluorine in the concentrate was very variable obtaining an average content of 813.08ppm with an average %Cu of 21.22%; however, the mining company required that the copper concentrate has a fluorine content of less than 700ppm. On the other hand, it was shown that obtaining a% masspull higher than 11% in the process the fluorine content decreased. Due to this, it was proposed to implement the Six Sigma methodology as a continuous improvement plan with the% masspull reference metric. The methodology was developed in 5 phases and they're the following: define: measure, analyze, improve and control (DMAIC). In the development of the methodology it was determined that the main cause affecting the %masspull was the% solids of the rougher stage.

Once the Six Sigma methodology was implemented, it concluded that the copper concentrate had a less variable fluorine content with an average of 555.384ppm and a %Cu of 21.435, reducing in 68% the cases where the fluorine content was higher than 700ppm.

Capítulo I:

1.1. Introducción

El Six Sigma, es una metodología pocas veces aplicada a un proceso no por su dificultad, sino por desconocimiento; por lo que su uso debe de ser considerado como una opción adicional para la mejora continua de un proceso.

Generalmente, cuando se quiere optimizar alguna etapa de una planta concentradora las soluciones más comunes son: cambiar de proveedor, modificar el circuito, adquirir nuevos equipos, contratar personal nuevo, etc. Pero, todas estas posibles soluciones generan una gran inversión económica. Lo ideal es incrementar la producción en función a lo que ya se tiene.

Se sabe que el flúor es un contaminante que genera una penalización muy alta al momento de comercializar los concentrados de una planta concentradora. Su reducción en los concentrados se da principalmente por una flotación directa o inversa conjuntamente con la adición de reactivos químicos específicos; sin embargo, estos no aseguran su reducción en un concentrado.

1.2. Antecedentes

Es necesario hacer mención a aquellos antecedentes los cuales están basados en la metodología Six Sigma.

Díaz (2008), en la tesis: “Mejora de la recuperación de molibdeno”, de la Universidad Nacional de Ingeniería, tiene como objetivo mejorar en un 0.83% la recuperación de molibdeno en el circuito cobre-molibdeno sin perjudicar la ley del Concentrado Rougher de Molibdeno y sin generar un aumento en el consumo de reactivos enfocándose en el uso del Lean Six Sigma. Concluyendo que dicha recuperación de molibdeno promedio aumentó en 1.5% y la variabilidad del proceso se redujo de 7.820 a 3.060 con un nivel sigma que mejoró de 1.040 a 1.440. La recuperación del molibdeno fue afectada por variables las cuales fueron: el flujo ingresante al circuito, el control del potencial óxido-reducción (ORP), %sólidos, ingreso de nitrógeno y el operador del área de flotación. Por otro lado, Díaz determinó que la variable diésel no afectó a la recuperación de molibdeno. Así también, la mejora del lazo de control para el flujo de alimento ocasionó que dicha variable mantenga su independencia, adicionalmente el ingreso de nitrógeno de forma independiente en cada una de las celdas de flotación permitió que el proceso sea más estable y como consecuencia disminuyó la variabilidad del proceso. Por último, el proceso mejoró con los cambios implementados y sin alguna inversión económica.

Tejada (2016), en la tesis: “Aplicación de la metodología Six Sigma para la mejora de la productividad en el proceso de filtrado de concentrado en la Compañía Minera Antamina Huaráz-Perú 2016”, de la Universidad César Vallejo, tiene como objetivo usar la metodología six sigma en el proceso de filtrado de concentrado y su impacto que esta genera en la productividad, así también como su impacto en la eficiencia y eficacia del proceso.

Concluyendo que existe un incremento en 6.09% en la productividad. Respecto a la eficiencia hay un aumento de 5.73% en función a la media del porcentaje de producción, el cual tuvo resultados significativos en lo que a la mejora se refiere. Respecto a la eficacia hay un incremento de 4.61% en función a la media del porcentaje del antes de usar la metodología y el después de aplicar la metodología, el cual tuvo resultados significativos en lo que a la mejora se refiere.

López (2017), en la tesis:” Implementación de TLS para mejorar la productividad en la planta de procesos de la Corporación Miyasato S.A.C.”, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, tiene como objetivos implementar el TLS y observar el impacto en el Lead Time, el cumplimiento de entrega y en la merma. Obteniendo como resultados, la Implementación del Modelo de Gestión TLS (Integración de Teoría de Restricciones, Lean Manufacturing y Six Sigma) que aumentó la productividad. Con la Implementación de TLS hubo una reducción promedio de 6.4% a 4.3% en la merma, con tendencia a seguir disminuyendo. Adicionalmente, se incrementó en promedio de 77% a 97% el cumplimiento de entrega. Además, se redujo el Lead Time productivo a 4 días, en porcentaje fue una reducción en más del 50%. Por último, la implementación de la metodología 5S mejoró en promedio de 85% a 95% la apariencia de la planta de procesos.

Mallqui (2018), en la tesis, “Aplicación de la metodología Six Sigma para reducir la merma de Scrap en el proceso de fabricación de sacos de polipropileno”, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, tiene como objetivo implementar la metodología DMAIC para disminuir la merma de scrap en el proceso de extrusión y telares del proceso de fabricación de sacos de polipropileno. Llegando a la conclusión en la fase definir, se determinó que la relación entre merma de scrap y la ineficiencia tenía un R cuadrado de 94.55, como consecuencia, se

reduciría la ineficiencia del proceso disminuyendo la merma de scrap. En la fase medir se determinó que en el proceso de extrusión y proceso de telares se originaba un 85% la merma de scrap; después, en la gráfica de Pareto se calculó que un 80% perteneciente a la merma se ocasionaba por: las lanzadas de extrusoras y su proceso; y la limpieza de bobinas en mal estado en telares y fileteo. Otros resultados de esta fase, fue la validación del sistema de medición y la corroboración de los procesos que están en control estadístico. En la siguiente fase, analizar, se determinó que controlando las variables más críticas de los procesos de extrusión y telares se reduciría la variabilidad el cual estuvo sustentado mediante pruebas de hipótesis. En las mejoras se elaboró especificaciones técnicas de las variables a controlar por proceso, además de la creación de instructivos y la capacitación de personal. La cuarta fase, que viene a ser mejorar se identificó según el Nivel de Prioridad de Riesgo total (NPR) que el proceso de extrusión se redujo de un 14.161 a 25005 en 80% y el proceso de telares se redujo de 9552 a 2875 en 70% .Por último, en la fase controlar, el proceso de extrusión, incrementó en 0.10% respecto al rendimiento y su nivel sigma aumentó 0.02; así mismo, el proceso de telares, el rendimiento incrementó en 0.64% respecto a su rendimiento y su nivel aumentó sigma 0.13. Adicionalmente, se redujo de 5% a 3.8% la merma de scrap, ahorrándose más de \$100000 dólares.

1.3. Planteamiento del problema

La reducción de elementos contaminantes en los concentrados de cobre es compleja y a la vez genera una gran inversión. Por lo cual, en el caso de no cumplir con un menor contenido de elementos contaminantes, existe el riesgo que aumente la penalización al momento comercializar los concentrados. Por ello surge la necesidad de probar la metodología Six Sigma para mejorar la calidad del concentrado de cobre.

1.4. Hipótesis

Debido que existen pocos casos en el cual se aplica la metodología Six Sigma para mejorar la calidad del concentrado de cobre, específicamente para reducir su contenido de flúor como elemento contaminante; se plantea la hipótesis de reducir el contenido de flúor en el concentrado de cobre teniendo como parámetro de control el %masspull.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos Generales.

Mejorar la calidad del concentrado de cobre aplicando la metodología Six Sigma.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Reducir el flúor en el concentrado de cobre controlando el %masspull en el circuito.
- Reducir la variabilidad del %masspull en el circuito.
- Identificar las variables que más afectan en la reducción del flúor en el concentrado de cobre.

1.6. Justificación

El uso de la metodología Six Sigma como una alternativa para estabilizar y optimizar el proceso sin o poca inversión económica, ideal para aplicarla en la reducción del contenido flúor en los concentrados de cobre; problema que ocasiona las altas penalidades al momento de comercializarlo. Por último, la gran variabilidad que existe en el proceso a investigar.

1.7. Limitaciones

La metodología Six Sigma se aplicó al presente circuito, el cual en otras palabras es

nuestro proceso. Si hubiera un proceso distinto, hay la necesidad de aplicar la metodología desde un inicio.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Calidad

Calidad tiene que ver con la eficacia y eficiencia en las actividades de una empresa el cual a su vez se relaciona con las necesidades, requerimientos, incomodidades o disconformidades que puede tener el cliente. Una forma de aumentar la eficiencia y eficacia de la empresa es con planificación, eliminación y controlando el proceso. Adicionalmente, es necesario mejorar la calidad del producto que recibe el cliente y hacer un seguimiento de ello (Ministerio de Fomento de España [MFOM], 2005).

Para Goetsh & Davis (2006) “La calidad es un estado dinámico asociado a productos, servicios, gente, procesos y medio ambiente que cumple o supera las expectativas” (p.832).

Por otro lado, Gutierrez y De la Vara (2013) definen:

La calidad consiste hacer que el cliente se sienta a gusto con el producto o servicio como consecuencia de haber cumplido con los requerimientos que este solicitaba. Estos requerimientos se deben a las necesidades, gustos, precios, etc. El cliente puede estar satisfecho con el producto o servicio si este cumple con los requisitos mínimos de su agrado. Lo ideal es ser más competitivo, en otras palabras, hacer que el producto o servicio sean de mejorar calidad a un menor precio.

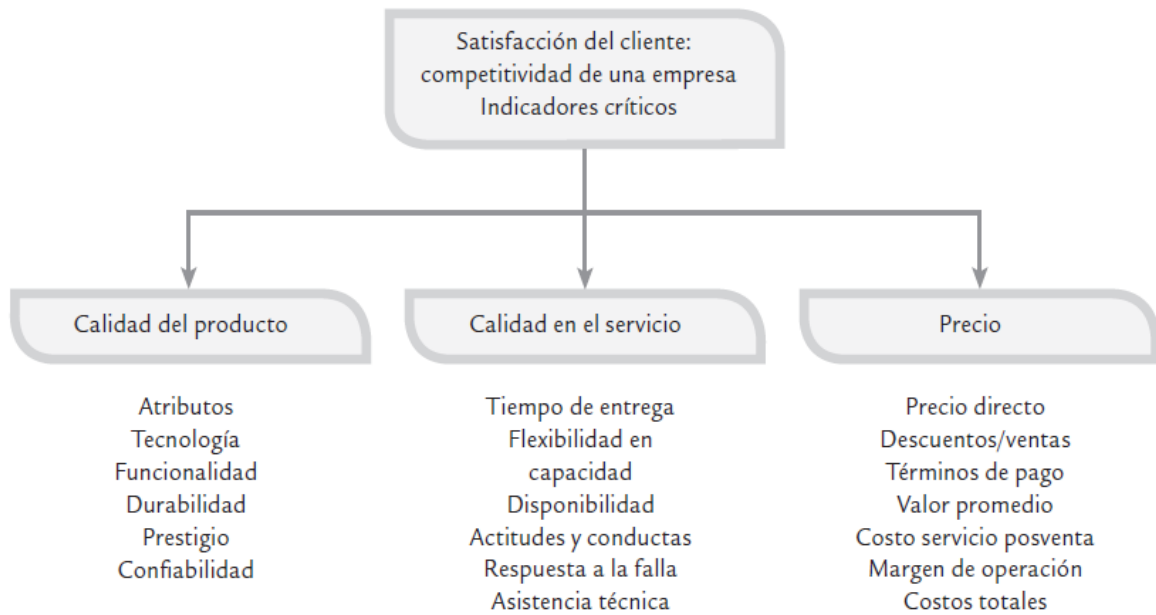


Figura 1. Indicadores de la competitividad y de la satisfacción del cliente.

Fuente: Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

2.2. Gestión de Calidad

Grupo de actividades que pertenecen a los encargados de la gestión los cuales determinan:

- La calidad vista como una política.
- Metas
- Responsabilidades.

Las cuales son implantadas por programación, control; y aseguramiento y mejora de la calidad (Verdoy, Mahinques, Pellicer y Prades, 2006).

2.3. Calidad Total

La calidad total está relacionado a un amplio grupo de personas que buscan satisfacer las necesidades de los clientes con un menor presupuesto. Este sistema administrativo involucra a todas las personas de todos los niveles de una empresa, así todas las áreas, además de los

proveedores y clientes. Se caracteriza por el enfoque a la mejora continua y aprendizaje como pilares esenciales para obtener el éxito esperado.

Para Navarro (2016), la calidad total se refiere como una filosofía a seguir, la cual está relacionada a la mejora continua de los procesos y sistemas, en el cual participan los trabajadores de la organización.

2.4. Proceso

“Un proceso es un conjunto de actividades, interacciones y otros componentes que transforma entradas en salidas que agregan valor a los clientes del proceso” (Bravo, 2008, p.27).

Bravo (2008) segmenta los procesos como macroprocesos y procesos operativos. El primero hace referencia a un proceso el cual puede subdividirse en otros procesos. Y el segundo, donde el proceso no puede subdividirse más y en donde hay una descripción detallada del proceso como tal con un flujograma con las actividades.

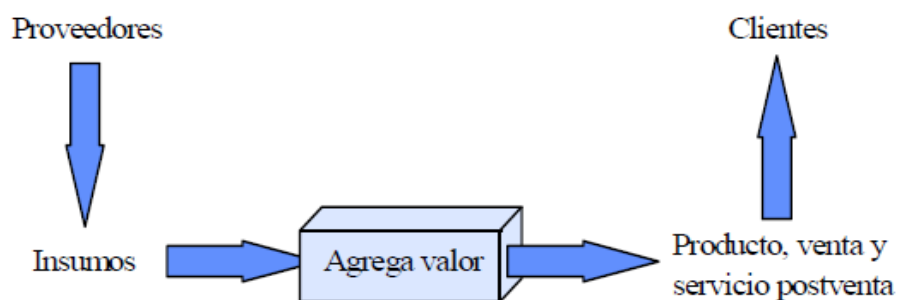


Figura 2. Una operación de negocios consta de insumos, valor agregado, producto, venta y servicio postventa.

Fuente: Gestión de Procesos (Bravo, 2008).

2.5. Introducción al Six Sigma

El Seis Sigma es una herramienta de mejoramiento que permite obtener organizaciones eficaces y eficientes, continuamente alineadas con las necesidades de los clientes. Se fundamenta en el trabajo en equipo como estrategia para generar las capacidades competitivas de la organización y de las personas involucradas. (Herrera y Fontalvo, 2011, p.2)

2.6. Metodología Six Sigma

Herramienta que permite mediante la mejora continua mejorar la eficiencia y eficacia de cierta organización enfocada en las necesidades del cliente. Está basado en el trabajo en equipo para lograr un desarrollo en la empresa y de forma personal. (Herrera y Fontalvo, 2011.

Huerga, Abad y Blanco (2012), definen Six Sigma como:

Un programa que en función a datos recolectados sigue el enfoque de la mejora continua con el objetivo de mejorar los estándares de calidad y a la vez disminuyendo los errores. Tiene una metodología la cual permite trabajar en forma estructurada y realizando un correcto análisis para lograr los objetivos fijados.

Por otro lado, si bien es cierto la metodología Six Sigma se puede aplicar a diversos tipos de procesos, es necesario mencionar que hay excepciones para selección de un proyecto Six Sigma. Debido a esto, Evans y Lindsay (2018) hacen referencia a factores a considerarse para seleccionar un proyecto Six Sigma:

- La mejora económica, que está ligado a los costos que se generan para lograr que un producto o servicio tengan buena calidad; además del ingreso económico y su inserción en el mercado.

- Su relación con los clientes y eficacia de la empresa
- El éxito visto desde el ámbito probabilístico.
- Su relación con los empleados
- La adaptabilidad a la estrategia y competitividad..

2.7. Fases del Six Sigma

La metodología Six Sigma sigue la estructura del DMAIC (Define, measure, analyze, improve and control), lo cual traducido en español es DMAMC (Definir, medir, analizar, mejorar y controlar). En cada una de estas fases se detallará los pasos a seguir para implementar esta metodología. Adicionalmente, el six sigma presenta una gran cantidad de herramientas a utilizar; sin embargo, todas no son obligatorias de usar. Como consecuencia, en cada fase se explicarán solo algunas de las herramientas utilizadas en la presente investigación.

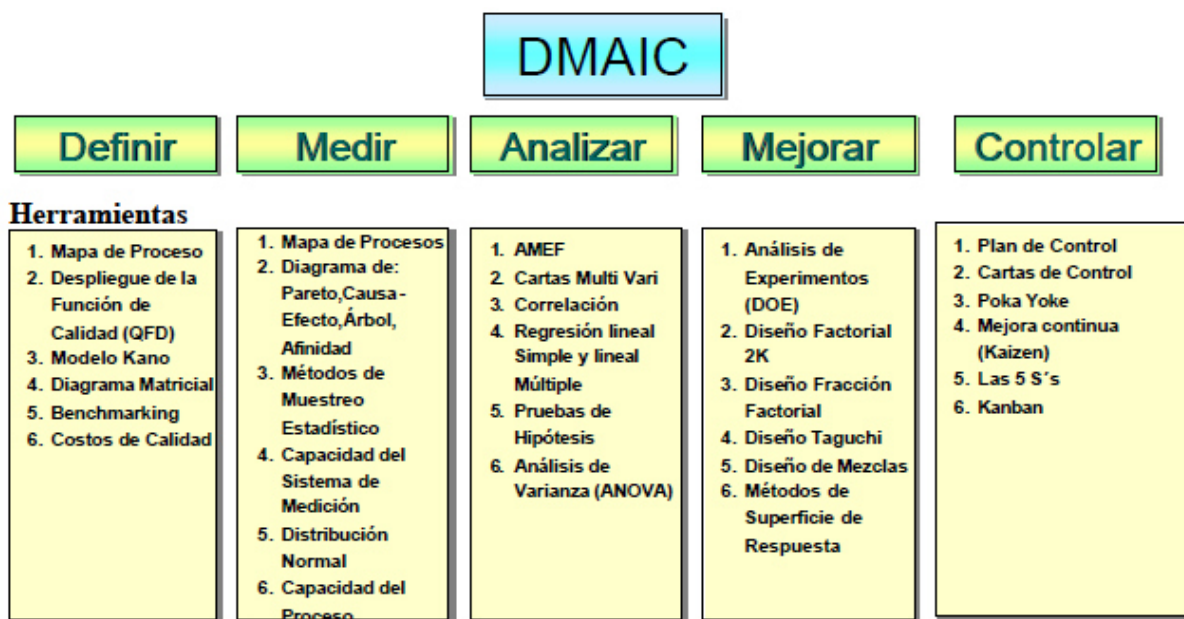


Figura 3. Herramientas utilizadas en la metodología Six Sigma.

Fuente: Curso de Seis Sigma. Recuperado de <http://www.icicm.com/files/CursoSeisSigma.pdf>

2.7.1. Fase Definir.

“En esta primera etapa se clarifican el objetivo del proyecto, la forma de medir su éxito, su alcance, los beneficios potenciales y las personas que intervienen en el proyecto” (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p.432).

Adicionalmente, en esta fase se debe de tener las siguientes consideraciones dichas por Herrera y Fontalvo (2011

- A partir de una evaluación previa, las personas involucradas deben identificar las áreas más delicadas, conocer la finalidad y saber hasta dónde abarcará el proyecto.
- Se debe estudiar a los clientes actuales así también a los clientes que son de gran potencial, de modo que podamos tener una solución de acuerdo a sus necesidades y lo que espera recibir respecto a un producto o servicio. Conocer a los clientes es el punto más importante para el desarrollo de una empresa.
- Según la evaluación previa se identifican los proyectos más importantes los cuales generen ingresos y el tiempo que tardaría en ejecutarlo.
- Conocer el proceso es de suma importancia más aún si se conoce a detalle ya que ayuda que los análisis que se realizan sean más confiables y permitan tomar mejores decisiones.
- Se debe nombrar a un líder del proyecto y este debe tener un grupo de personas en las que se pueda apoyar. El líder de proyecto debe tener suficiente experiencia en el proceso donde se desarrolla el proyecto, además debe conocer el enfoque Seis Sigma y saber comunicar sus conocimientos al grupo de trabajo para lograr el objetivo planteado. De igual forma, las personas pertenecientes al equipo de trabajo deben tener experiencia respecto al proceso a mejorar.

A continuación se mencionarán y explicarán algunas herramientas utilizadas en esta fase:

Diagrama SIPOC/PEPSU

El objetivo de un diagrama SIPOC es evaluar el proceso y todo lo relacionado a él. En este caso intervienen los proveedores - suppliers (P-S respectivamente), que brindan las entradas - inputs (E – I respectivamente), al proceso – process (P), y este genera productos o salidas - outputs(S –O respectivamente) lo cuales son de interés para los clientes - customers(U – C respectivamente). En español el acrónimo es PEPSU y en inglés es SIPOC (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

Para desarrollar un diagrama SIPOC, Gutiérrez y De la Vara (2013) afirman que se debe seguir el siguiente orden:

- Primero, el proceso debe estar delimitado y graficar su diagrama de flujo en donde se detallen las principales cuatro o cinco etapas del proceso.
- Segundo, se debe identificar las variables de salida, que vienen hacer los resultados, ya sea bienes o servicios, que se originan del proceso.
- Tercero, identificar a los que reciben o tienen algún beneficio del producto del proceso, en otras palabras, los usuarios o clientes.
- Cuarto, reconocer las variables de entrada que intervienen en el proceso de tal forma que funcione correctamente.
- Por último, se debe conocer a los que suministran las entradas, más conocidos como proveedores.

Mapa de Procesos

Gutiérrez y De la Vara (2013) lo definen como un diagrama de flujo del proceso donde se muestran las actividades que se realizan en ella. El diagrama puede ser nivel macro o micro. En el caso de un mapa de procesos nivel macro no se entran a detalles, generalmente se delimitan los subprocesos y se hace un análisis superficial. Cuando es un mapa de procesos

nivel micro es donde se analiza de forma detallada el proceso y se identifiquen los siguientes puntos como:

- Los inputs y outputs del proceso.
- Actividades donde haya o no un aumento de valor al proceso.
- Los inputs deben clasificarse como ruido (\square), controlable (o) y crítico (*).
- Se debe conocer los objetivos y rangos para las variables críticas y controlables.

2.7.2. Fase Medir.

El objetivo general de esta segunda fase es entender y cuantificar mejor la magnitud del problema o situación que se aborda con el proyecto. Por ello, el proceso se define a un nivel más detallado para entender el flujo del trabajo, los puntos de decisión y los detalles de su funcionamiento; asimismo, se establecen con mayor detalle las métricas (las Y) con las que se evaluará el éxito del proyecto. Además se analiza y valida el sistema de medición para garantizar que las Y pueden medirse en forma consistente. Además, con el sistema de medición validado se mide la situación actual (o línea base) para clarificar el punto de arranque del proyecto con respecto a las Y. (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p.406)

A continuación se mencionarán y explicarán algunas herramientas utilizadas en esta fase:

Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R)

La repetitividad hace referencia a la precisión de varias mediciones hacia algo bajo las mismas condiciones, por ejemplo cuando se realiza una medición con un mismo personal; mientras que, la reproducibilidad es la precisión de varias mediciones pero con diferentes condiciones, por ejemplo al realizar mediciones con diferente personal. Este tipo de estudio determina qué porcentaje de la variabilidad es debido al error en la medición y si este

porcentaje de variabilidad es mayor o menor a la variabilidad de mi variable de salida y de su tolerancias (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

Verificación de Normalidad

Existen métodos estadísticos en los cuales se pueden verificar la normalidad de los datos, como por ejemplo: Anderson Darling, Kolmogorov y Ji-Cuadrada, de los cuales el más usado es Anderson Darling. Por otro lado, existe el método gráfico llamado Gráfica de Probabilidad. Gutiérrez y De La Vara (2013) describen a la gráfica de probabilidad como: “Un procedimiento que permite determinar en forma visual si los datos muestrales se ajustan a una distribución específica. La gráfica de probabilidad es una gráfica del tipo X-Y cuyas escalas son determinadas por la distribución elegida” (p.51).

Capacidad de Proceso

“Consiste en determinar la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada. Esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria” (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p.18).

La capacidad de proceso está basada en dos indicadores: Estabilidad y Capacidad.

Estabilidad

Indica una distribución a través del tiempo, la cual está determinada por la variabilidad en cierto momento y con su respectivo ancho de dispersión. Se considera estable cierto proceso cuando la ubicación y distribución que tiene debido a su media (\bar{X}) y los puntos extremos de dispersión, no se encuentren o sí en los rangos de tolerancia óptima, no aumenten o disminuyan fuertemente en el transcurrir del tiempo (Verdoy et al., 2006).

Capacidad

Cuantifica la actualidad de un proceso respecto a una tolerancia determinada por un límite máximo y mínimo. Respecto a su evaluación se utilizan 2 parámetros que muestran la relación de la distribución y su rango en función a los límites de tolerancia (Verdoy et al., 2006).

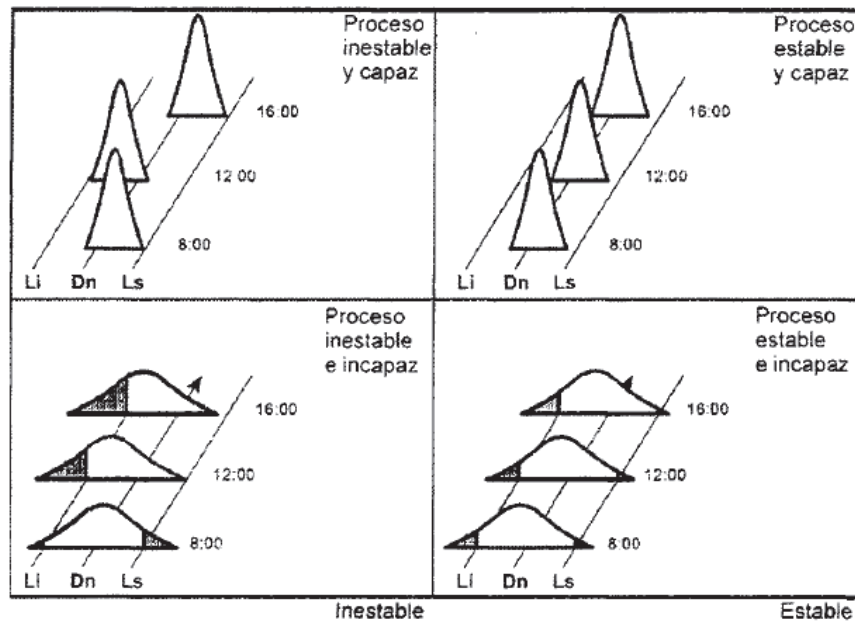


Figura 4. Estabilidad y capacidad de un proceso.

Fuente: Manual de Control Estadístico de Calidad: Teoría y Aplicaciones (Verdoy et al., 2006).

2.7.3. Fase Analizar.

Gutierrez y De la Vara (2013) mencionan que la fase analizar tiene como fin identificar la/las variables de entrada más importantes que ocasionan el problema, así también entender cómo funcionan y verificar las sospechas a partir de datos. Por lo tanto, es identificar la forma como se origina el problema, entender y verificarla con datos.

Bahena y Reyes (2006) afirman que para desarrollar una buena fase de análisis es necesario tener las siguientes consideraciones:

- Seleccionar las variables de desempeño

- Hacer un benchmarking de las métricas de desempeño
- Descubrir el desempeño mejor en su clase.
- Realizar un análisis de brechas
- Identificar factores de éxito
- Definir objetivos de desempeño. (pp.9-10)

A continuación se mencionarán y explicarán algunas herramientas utilizadas en esta fase:

Diagrama de Ishikawa

Gutiérrez y De la Vara (2013) definen al diagrama de Ishikawa o también llamado diagrama Causa-Efecto, como una herramienta gráfica que relaciona el problema de un proceso con las posibles causas que la ocasionan. El diagrama de Ishikawa está enfocado en indagar todas las posibles causas que originan el problema, logrando así identificar las verdaderas causas y no centrarse solamente en algunas.

Diagrama de Pareto

Es una herramienta gráfica bidimensional donde las causas que ocasionan problemas a proceso se listan en el eje “X” (horizontal), empezando a listarlas desde la izquierda a las que causan mayor impacto en el problema, e ir colocando según su efecto hacia la derecha. El diagrama presenta doble eje “Y” (vertical). El eje vertical izquierdo representa el impacto generado por las causas; en cambio, el eje vertical del lado derecho representa el porcentaje de las causas acumuladas. El principio dice que el 80% aproximada de los efectos de un problema son debidos solo al 20% de las causas involucradas (Bahena y Reyes, 2006).

Pruebas de Hipótesis

Para realizar una prueba de hipótesis primero se parte de un parámetro hipotético. Segundo se realiza un muestreo aleatorio al que se calcula sus estadísticos, entre ellos la media el

cual se compara con el parámetro hipotético. Tercero, se analiza si se acepta el parámetro hipotético o si es rechazado (Bahena y Reyes, 2006).

Diagrama De Dispersión

Las gráficas de dispersión permiten evaluar la correlación entre las variables X e Y. Cuando hay una correlación directamente proporcional (X aumenta e Y aumento; y viceversa), la correlación entre ellas se dice que es positiva. En el caso que X disminuya e Y aumente la correlación es negativa (Verdoy et al., 2006)

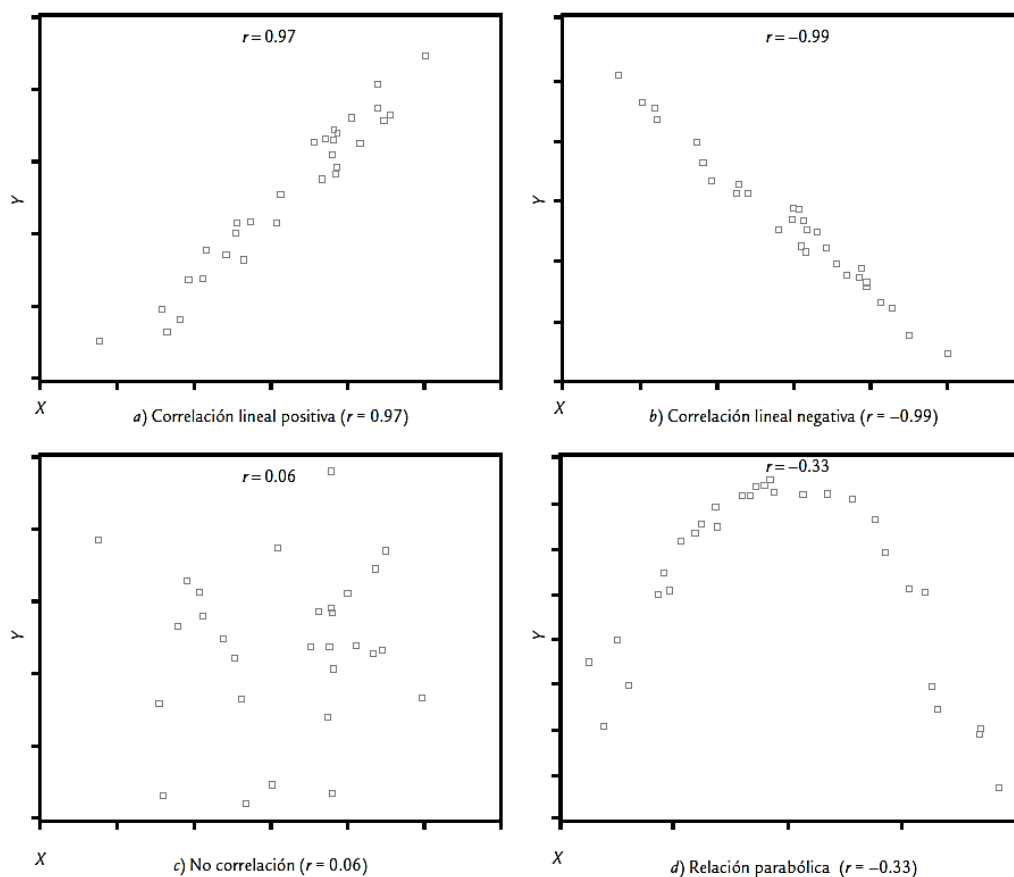


Figura 5. Patrones de correlación.

Fuente: Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

Análisis de Varianza (ANOVA)

Es un método estadístico que consiste en comparar dos medias de diferentes grupos de datos. Al hablar de un ANOVA de un criterio se evalúa la variación de los datos a partir de la varianza. Se dice que es de un criterio porque se evalúa un factor (Bahena y Reyes, 2006).

2.7.4. Fase Mejorar.

La finalidad de esta etapa es optimizar las variables que generan el problema en el producto. Para realizar una mejora es necesario manejar ciertas herramientas como lo son los diseños de experimentos (DOE), lluvia de ideas, poka-yoke, entre otras (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

Bahena y Reyes (2006) afirman que se deben tener las siguientes consideraciones en la fase mejorar:

- Seleccionar variables de desempeño;
- Diagnosticar desempeño de las variables;
- Definir variables causales (DOE);
- Confirmar variables causales;
- Establecer límites de operación;
- Verificar mejoramiento del desempeño. (p.10)

A continuación, se mencionará y explicará la herramienta utilizada en esta fase:

Diseño de Experimentos

Un diseño de experimentos son un conjunto de pruebas el cual otorga al interesado la facultad de evaluar más de dos métodos con la finalidad de determinar el mejor, o identificar los parámetros controlables con los que se pueda optimizar o reducir su variabilidad el

proceso. Los diseños de experimentos se diferencian de los análisis estadísticos por la observación, ya que en el DOE los parámetros de interés son controlados por la persona que está desarrollando el experimento, y no de forma aleatoria producto de la observación (Evans y Lindsay, 2008).

Tabla 1
Pautas generales para diseñar un experimento

Pasos
1. Identificación y exposición del problema.
2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.
3. Selección de la variable de respuesta.
4. Elección del diseño experimental.
5. Realización del experimento.
6. Análisis estadístico de los datos.
7. Conclusiones y recomendaciones.

*En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

Fuente: Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

2.7.5. Fase Controlar.

“En esta etapa se diseña un sistema que mantenga las mejoras logradas (controlar las X vitales) y se cierra el proyecto. Las acciones de control se dan en tres niveles: proceso, documentación y monitoreo” (Gutiérrez y De la Vara, 2013, p.443).

A continuación se mencionará y explicará la herramienta utilizada en esta fase:

Cartas de Control

Las cartas de control permiten evaluar los datos del proceso en el tiempo, siendo este su principal objetivo. Este tipo de análisis en una carta de control facilita determinar la variabilidad lo cual permite mapear un proceso y tomar mejores decisiones. El análisis se da principalmente en los productos del proceso o variables de salida; sin embargo, además podrían aplicarse a los parámetros de entrada (Gutiérrez y De la Vara, 2013).

Capítulo III: Caracterización del Mineral

3.1. Análisis Químico

El alimento que ingresa al circuito fue sometido a análisis químico para determinar el contenido de los siguientes elementos de interés: cobre, fierro, molibdeno, insolubles, óxido de magnesio y flúor. La tabla N° 2 muestra los resultados.

Tabla 2

Análisis químico del alimento al circuito moly

Elemento	%Cu	%Fe	%Mo	%INS	%MgO	Flúor(ppm)
	19.42	24.60	0.14	20.15	5.89	1226.95

*Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos muestran al alimento un grado de cobre de 19.42% y un grado de fierro de 24.60%; sin embargo, el contenido de flúor es de 1226.95ppm. Por otro lado, el grado de molibdeno es 0.14%. Además el MgO y el insoluble representan 5.89% y 20.15% respectivamente.

3.2. Caracterización Mineralógica

El análisis mineralógico se realizó mediante el método de difracción de rayos X (DRX) en el equipo D8 Endeavor, el cual se caracteriza por tener un tubo de cobalto.

3.2.1. Distribución Modal.

Con el objetivo de identificar y cuantificar los distintos minerales presentes en el alimento al circuito se procedió aplicar la técnica mencionada líneas arriba en 9 muestras diferentes, cuyos resultados se pueden apreciar en la figura 6, donde se muestra a la calcopirita con porcentajes mayores a 31%, seguido de la pirita con valores entre 20% y 28%; y talco con valores entre 8% y 12% como los minerales que se presentan en mayor cantidad.

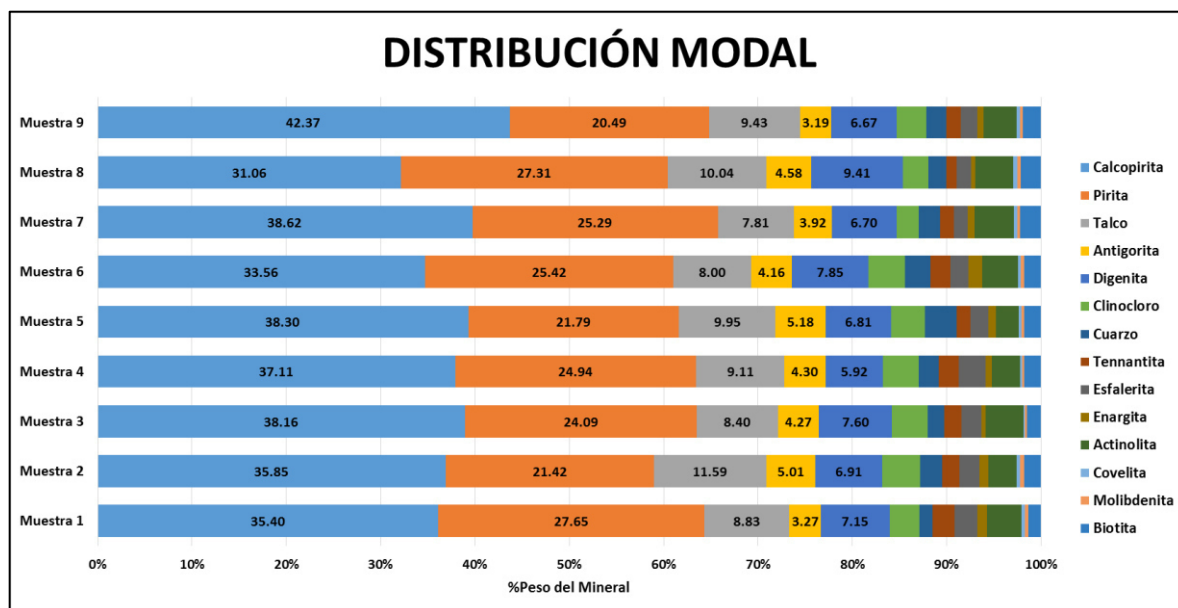


Figura 6. Composición mineralógica de muestras individuales determinadas por el método de DRX.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el análisis individual, se procedió a calcular el promedio de dichas muestras obteniendo un resultado representativo. Ver figura 7

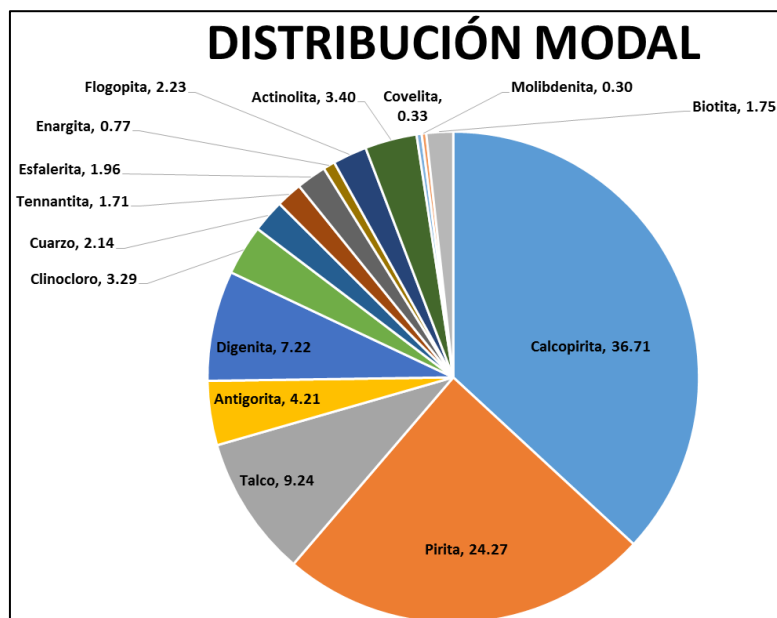


Figura 7. Composición mineralógica promedio.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la técnica de DRX se clasificó a los minerales en 6 grupos cuyos valores porcentuales se muestran en la figura 8:

- **Sulfuros de cobre:** Calcopirita, digenita, y covelita.
- **Cobre grises:** Tennantita y enargita.
- **Silicatos duros (según escala de Mohs, MPa):** Cuarzo y actinolita.
- **Filosilicatos:** Talco, antigorita, clinocloro, flogopita y biotita.
- **Sulfuro de hierro:** Pirita.
- **Otros Sulfuros:** Esfalerita y molibdenita.

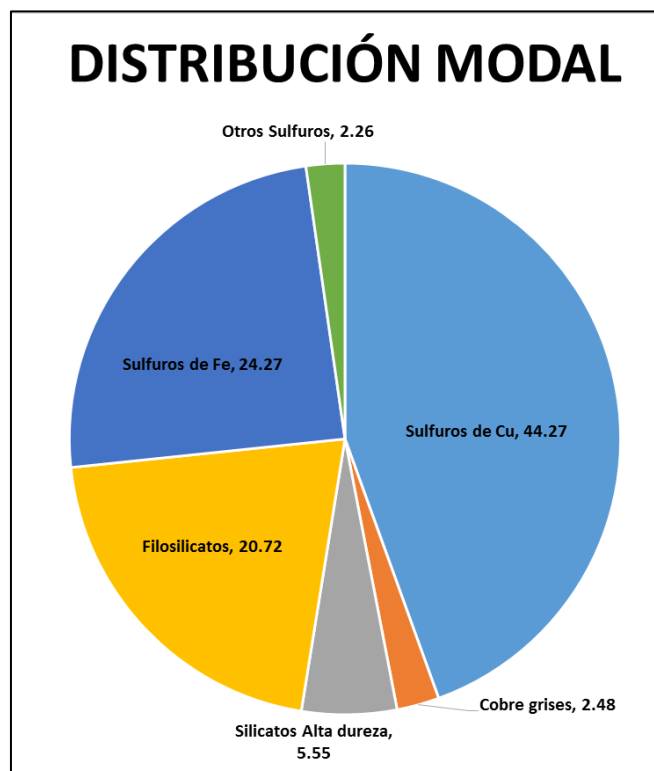


Figura 8. Distribución modal por grupos.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 9 detalla los minerales aportantes de cobre al circuito. Se observa con total claridad que el principal aportante es la calcopirita con 36.71%, luego la digenita (7.22%), y en menor cantidad la tennantita, enargita y covelita con 1.71%, 0.77% y 0.33% respectivamente.

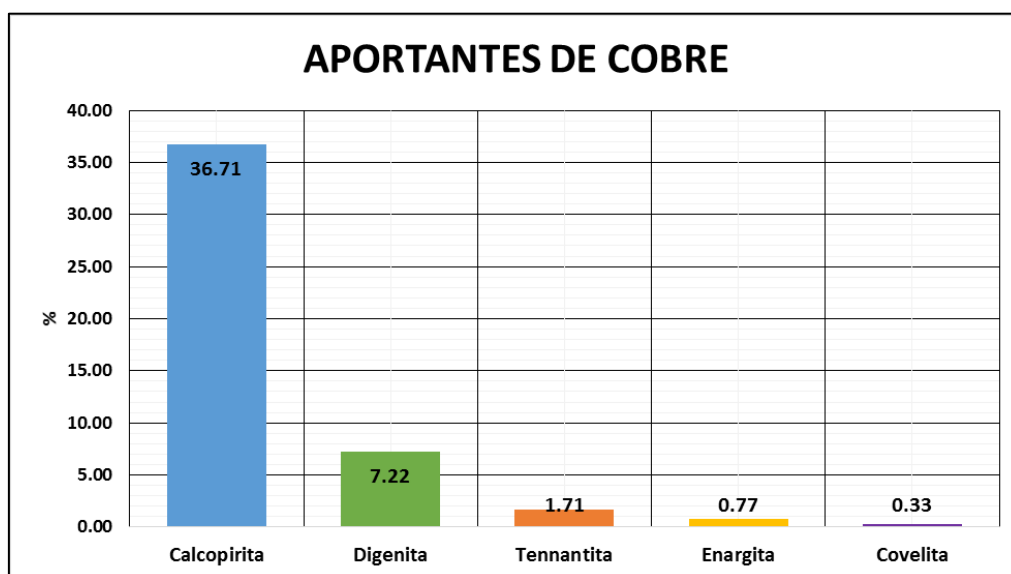


Figura 9. Identificación de minerales aportantes de cobre.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 10 muestra los aportantes de flúor en el alimento, donde las micas (flogopita y biotita) son los únicos minerales aportantes.

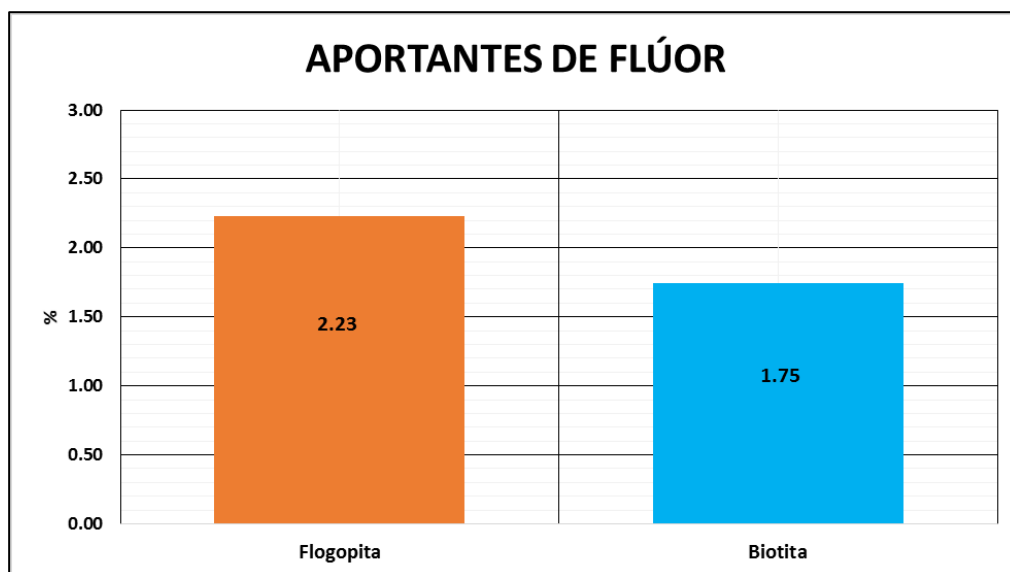


Figura 10. Identificación de minerales de flúor.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo IV: Aplicación del Six Sigma

4.1. Fase Definir

La primera fase de la metodología Six Sigma se establecerá el objetivo del proyecto, se conocerá los clientes internos y externos, sus requerimientos; y la relación entre nuestro proceso y los clientes. Además, se conocerá nuestro proceso a grandes rasgos. Debido a lo mencionado, se utilizará una serie de herramientas:

- Mapa de Procesos – Primer Nivel
- Matriz Causa-Efecto
- Diagrama SIPOC
- Diagrama Crítico

4.1.1. Mapa de Procesos – Primer Nivel.

Para empezar este proyecto, primero es necesario saber en qué parte de todo el proceso productivo es donde se ubica el proceso el cual se mejorará. En la figura 11 se muestra que la planta concentradora consta del área de chancado, molienda, flotación, espesamiento y filtración. La flotación se divide en circuito rougher bulk, circuito cleaner bulk, circuito cleaner Cu y circuito moly. A su vez, el circuito moly se subdivide en rougher moly, 1ra. cleaner moly, cleaner scavenger moly y 2da. cleaner moly. En esta oportunidad el proyecto de mejora se desarrollará exclusivamente en el circuito moly.



Figura 11. Diagrama de Bloques de Procesos – Primer Nivel

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Identificación del Cliente.

Los clientes son las personas o áreas involucradas que están interesados en los productos de nuestro proceso; debido a estos, dichos productos (para nosotros los concentrados de cobre) deben cumplir con ciertos requerimientos o condiciones. Puede haber clientes internos los cuales pertenecen a la empresa dueña del proceso. En nuestro caso, los clientes internos pertenecen a la Gerencia de Operaciones y a la Gerencia Comercial. Mientras que los clientes externos, son aquellos que no pertenecen a la empresa dueña del proceso, por ejemplo las empresas internacionales que compran los concentrados de cobre.

4.1.3. Requerimientos del Cliente.

Para poder tener claro los requerimientos de los nuestros clientes se usó la matriz causa-efecto (figura 12) en donde además se mencionan las etapas del proceso. La finalidad es encontrar que requerimientos del cliente y etapas del proceso son las más importantes y su relación entre ellas.

Rating of Importance to Customer		9	9	5	
		1	2	3	
Process Steps / Input Variables		Maximizar la ley de Cu	F menor a 700 ppm	Minimizar %MgO	Total
1	Rougher Moly	8	8	5	169
2	1ra. Cleaner Moly	3	4	2	73
3	Cleaner Scavenger Moly	4	6	2	100
4	2da. Cleaner Moly	4	6	2	100
Total		171	216	55	

Figura 12. Matriz Causa – Efecto

Fuente: Elaboración propia

El cliente principal en este caso viene a ser la Gerencia Comercial, ya que son ellos quienes fijaron las condiciones que debe tener el concentrado de cobre para poder comercializarlo. Sin embargo, la Gerencia de Operaciones también participó en esta matriz causa-efecto desde el punto de vista productivo. La Gerencia Comercial solicitó al área de metalurgia mejorar la ley de cobre, el contenido de flúor debe ser menor a 700ppm y tener un %MgO lo mínimo posible en el concentrado de cobre. Considerando una escala de 1 al 10 donde 10 es el valor más importante y 1 el menos importante, los requerimientos más importantes del cliente con una puntuación de 9 son maximizar la ley de cobre y tener un flúor menor a 700ppm. El mismo procedimiento se realizó para la etapas del proceso considerando a la etapa rougher moly, cleaner scavenger moly y 2da. cleaner moly las más importantes, teniendo en cuenta que estas 2 últimas etapas tienen la misma puntuación al ser etapas finales del proceso.

Al momento de relacionar los requerimientos del cliente con las etapas del proceso, el requerimiento más importante fue tener un contenido de flúor menor a 700ppm con una

puntuación total 216 seguido de maximizar la ley de cobre con una puntuación de 171. En el caso de las etapas del proceso el más importante fue la etapa rougher moly con una puntuación de 169, seguido de las etapas cleaner scavenger y 2da. cleaner con 100 puntos cada una.

4.1.4. Diagrama SIPOC.

En el diagrama SIPOC (Figura 13), se muestran los proveedores (Supplier), entradas (Input), salidas (Output), clientes (Customer) para cada etapa del proceso (Process). El objetivo es conocer poco a poco el proceso.

S (supplier)	I (input)	P (process)	O (output)	C (customer)
ESPEADOR BULK	ALIMENTO RO-MOLY	ROUGHER MOLY	CONC. Cu FINAL	AREA DE FILTROS
SERVICIOS GENERALES	REACTIVO(NaSH)		CONC. RO-MO	1RA. CLEANER MOLY
CIRCUITO MOLY	RELAVE 1RA CLEANER			GERENCIA OPERACIONES
CIRCUITO MOLY	CONC. Ro-Mo	1RA CLEANER MOLY	RLV 1RA CLEANER	ROUGHER MOLY
	RELAVE CL-SCV Mo		CONC. 1RA CLEANER (3CELDAS)	2DA. CLEANER MOLY
	RELAVE 2DA CLEANER		CONC. 1RA. CLEANER 4TA CELDA	CLEANER SCAVENGER MOLY
CIRCUITO MOLY		CLEANER SCAVENGER MOLY	RLV CL-SCV	1RA. CLEANER MOLY
	CONC. 1RA CLEANER (3CELDAS)		CONC. CL-SCV(TALCO)	AREA RELAVES
CIRCUITO MOLY		2DA. CLEANER MOLY	RLV 2DA CLEANER	1RA. CLEANER MOLY
	CONC. 1RA. CLEANER 4TA CELDA		CONC. 2DA CLEANER(TALCO)	AREA RELAVES

Figura 13. Diagrama SIPOC

Fuente: Elaboración propia

Para la etapa rougher, sus entradas son el alimento rougher que proviene del espesador bulk, el reactivo NaSH proveniente del área de servicios generales y el relave de la 1ra. cleaner que proviene del mismo circuito moly (el proceso) que es recirculado. Respecto a las salidas, se obtiene 2 productos, el concentrado cobre final y el concentrado rougher, donde el primero es de interés para el área de filtros y para la gerencia de operaciones debido que es un producto final; respecto al segundo concentrado, este es dirigido a la etapa 1ra. cleaner.

En la etapa 1ra. cleaner, se identificaron 3 entradas (concentrado rougher, relave cleaner scavenger y relave 2da. cleaner), las cuales provienen del mismo circuito. En esta etapa tiene 3 salidas, relave 1ra. cleaner que recircula hacia la etapa rougher y el concentrado 1ra. cleaner en donde las 3 primeras celdas del banco de flotación se dirigen a la etapa 2da. cleaner, mientras que la última celda del banco de flotación se va a la etapa cleaner scavenger.

Por último, las etapas cleaner scavenger y 2da. cleaner, son muy similares porque ambas pertenecen a la parte final del proceso, sus entradas son las 3 primeras celdas y la 4ta celda de la etapa 1ra. cleaner, las cuales provienen del circuito. En relación a sus productos, en la etapa cleaner scavenger y 2da. cleaner sus relaves recirculan a la 1ra. cleaner y mientras que sus concentrados son dirigidos al área de relaves. Para una mejor apreciación ver el flowsheet del proceso (figura 14).

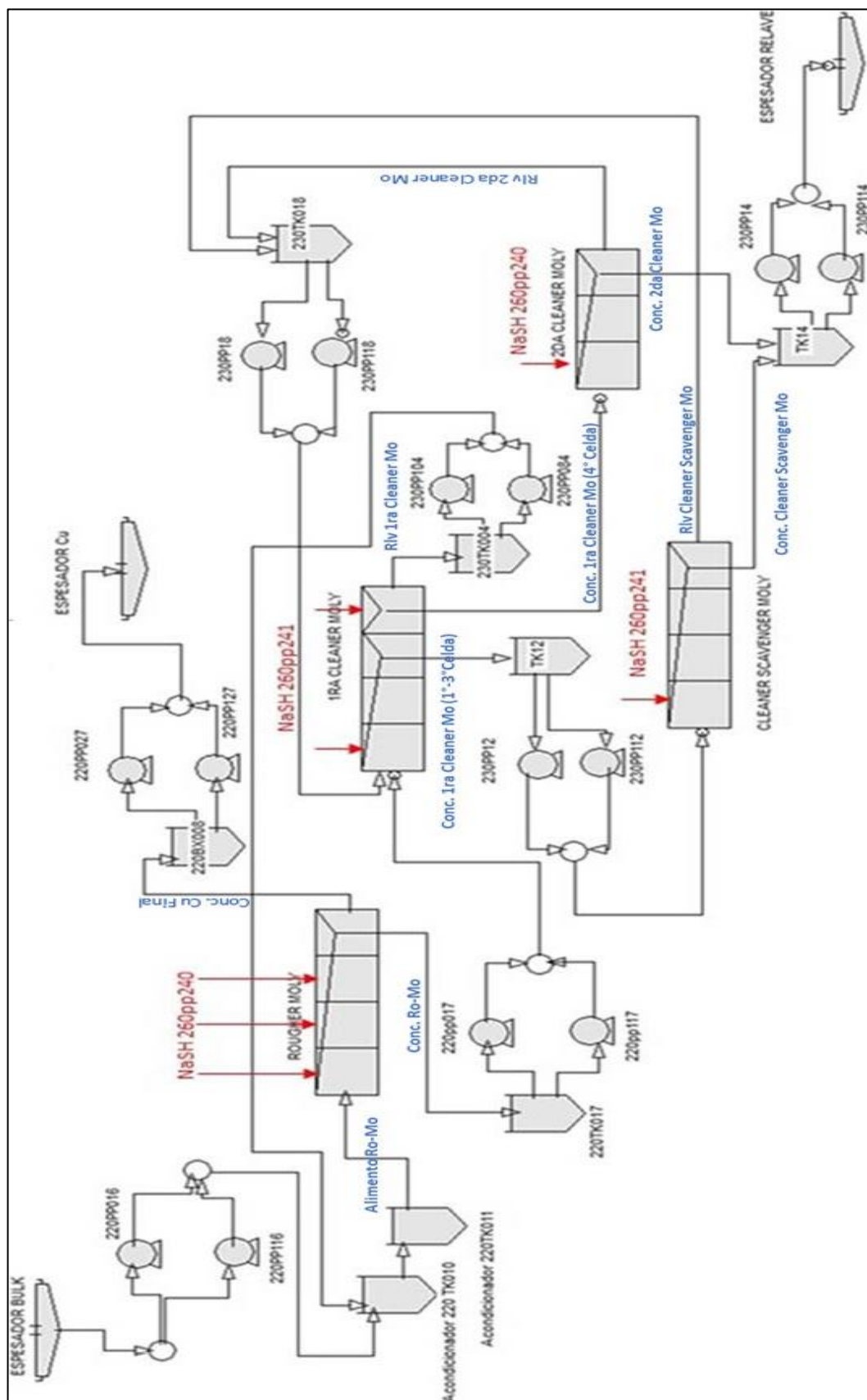


Figura 14. Diagrama del flujo del proceso.

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Identificación de la métrica

Conocido el requerimiento más importante del cliente (un contenido de flúor menor a 700ppm) y el diagrama SIPOC (figura 13) fue necesario identificar una métrica con la cual se logre controlar dicho requerimiento. Si bien es cierto, se puede determinar el contenido de flúor en los concentrados vía ensayo químico; sin embargo, esta vía no arroja resultados inmediatos. Como consecuencia, el flúor fue relacionado con el %masspull del circuito donde se determinó que estas 2 variables son inversamente proporcional. Ver figura 15

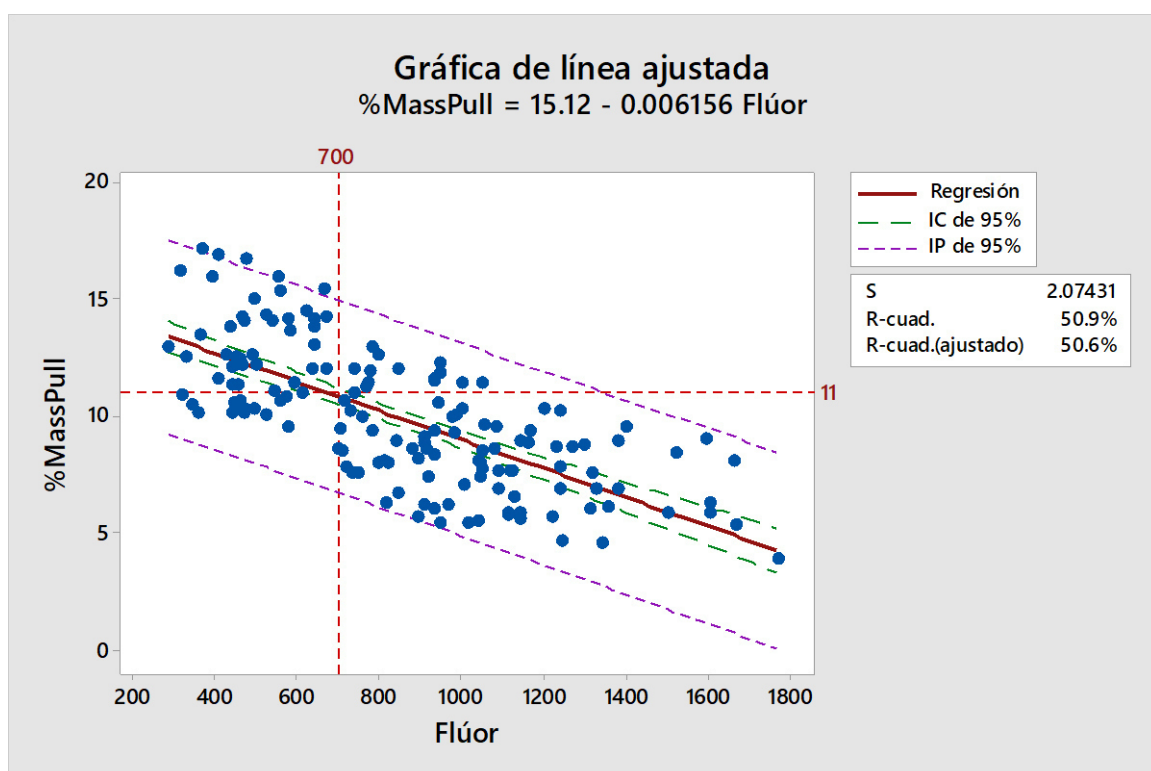


Figura 15. Gráfica de regresión Flúor vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

Además, en la figura 15 se observa que se pueden obtener concentrados de cobre con contenidos de flúor menores a 700ppm cuando el %masspull es superior a 11%. Por otro lado; el término %masspull es el % de recuperación másica y en términos matemáticos se ve expresada en la ecuación 1. Es necesario mencionar que los grados de cobre que

intervienen en el %masspull son datos que provienen del analizador en línea Courier 6i; y al ser datos en línea funciona como parámetro de control.

$$\%MassPull = \frac{(\%Cu\ Concentrado\ cobre) - (\%Cu\ Alimento)}{(\%Cu\ Cocentrado - \%Cu\ Cocentrado\ Talco)} \dots\dots\dots (Ec.1)$$

4.1.6. Diagrama Crítico.

En el presente diagrama crítico (Figura 16) se realizó un análisis preliminar de las etapas del proceso en función de las 6M's (material, mano de obra, maquinaria, método, medio ambiente y medición) con la finalidad de tener una percepción de cuáles son los elementos críticos (CR) y los no críticos (N) a considerar al momento de satisfacer los requerimientos del cliente.

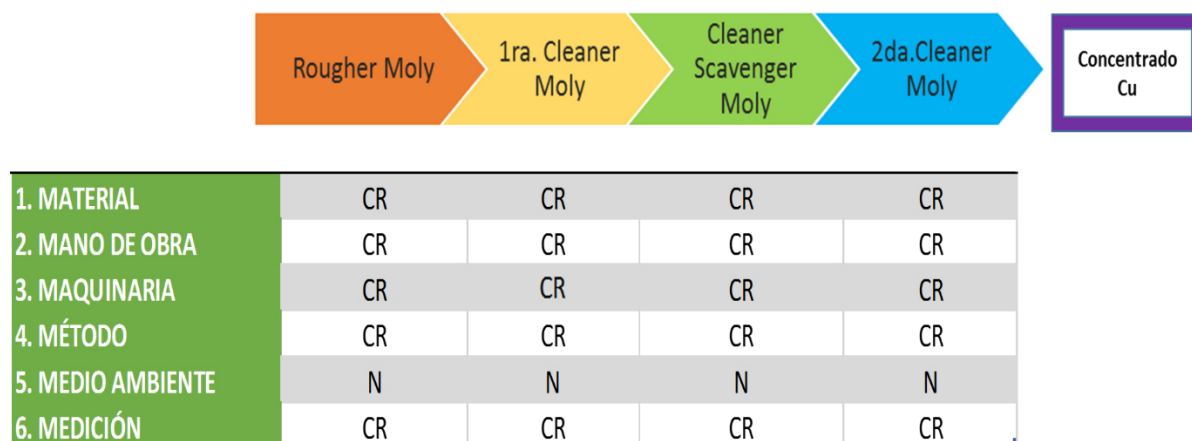


Figura 16. Diagrama Crítico

Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se observa claramente al medio ambiente como no crítico(N); sin embargo, el resto sí es considerado como crítico (CR) porque genera un impacto a la calidad de los concentrados de cobre. Más adelante, en la fase medir, se detallarán las 6M's y se hará un análisis más exhaustivo con otras herramientas características del Six Sigma.

4.2. Fase Medir

Una vez ya identificado el requerimiento del cliente en la fase definir, en esta segunda fase

se empezará a detallar el proceso, conoceremos más respecto a las 6M's que se mencionaron en el diagrama crítico (figura 16) y como estas afectan dichos requerimientos, además se realizará un estudio de medición y se conocerá la situación actual del proceso en función a su capacidad. Las herramientas que se utilizarán en esta fase son las siguientes:

- Diagrama de Ishikawa
- Mapa de Procesos – Segundo Nivel
- FMEA/AMFE
- Sistema de medición R&R

4.2.1. Diagrama de Ishikawa.

En el diagrama de Ishikawa (figura 17) se detallaron las 6M's. Cabe señalar que lo que se busca en este diagrama es mencionar las posibles causas que está originando que no se cumpla con el requerimiento del cliente.

Primero, en el caso de material se mencionó la variabilidad del mineral porque como se sabe, un mineral no es homogéneo y varía dependiendo de la zona de donde se extrae; y además de la variabilidad que se origina producto de las etapas anteriores del proceso mencionadas en el mapa de procesos – primer nivel (figura 11). Respecto al material, también se mencionó el uso del reactivo inadecuado debido que en este proceso se usó el reactivo NaSH; sin embargo, otra posibilidad sería probar otro tipo de reactivo.

Segundo, en relación a la mano de obra se hizo referencia a los operadores que controlan el proceso. Estos operadores deben tener cierta experiencia y la vez deben ser capacitados constantemente para un buen rendimiento. En el compromiso, la distracción es un punto

importante porque puede que los operadores usen constantemente el celular y realicen actividades las cuáles no sean beneficiosas para el proceso, además de su seguridad.

Tercero, respecto a la maquinaria, se hizo el cuestionamiento en el tamaño de celdas de flotación, los tipos de bombas y cajones si eran los adecuados o no para este proceso. El funcionamiento de estos es adecuado o presentaban fallas, además si seguían un programa de mantenimiento preventivo.

Cuarto, en el caso del método, se hizo referencia a los estándares de producción (flotación inversa) y si se tenía buenos parámetros de control como los flujos de alimentación, porcentajes de sólidos, ingreso de aire, altura del colchón de espuma y el potencial óxido reducción (ORP).

Quinto, por el lado del medio ambiente, el clima predominante en la zona es la presencia de tormentas eléctricas y heladas. Por consiguiente, cuando hubo tormentas eléctricas, se obligó a todo el personal que se encontraba en campo a dejar la actividad que estaba realizando y resguardarse. En las heladas, se sugería abrigarse.

Por último, en la medición, se mencionó la calibración de los analizadores en línea (Courier) y los potenciómetros; debido que un valor erróneo haría tomar malas decisiones para controlar el proceso.

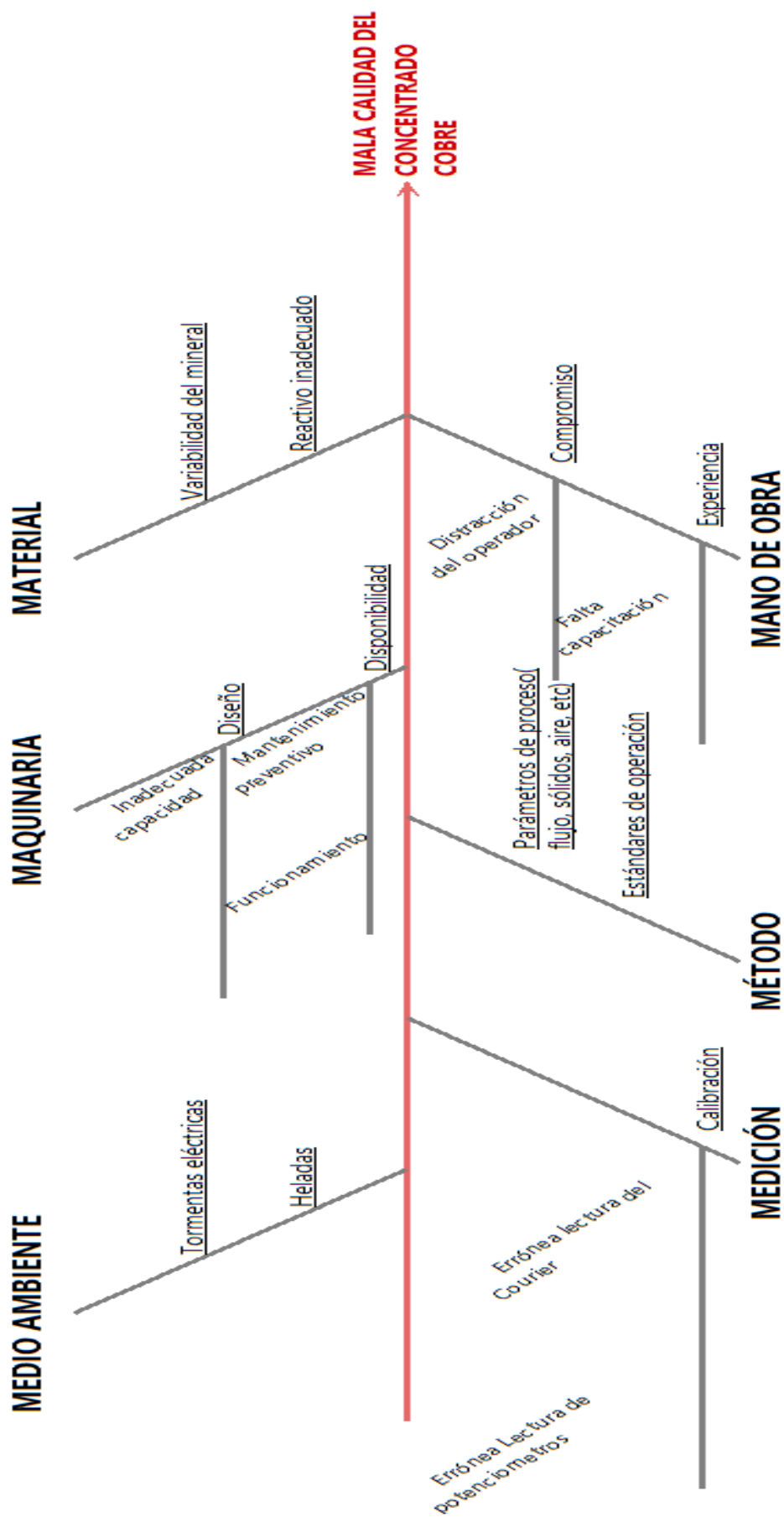


Figura 17. Diagrama de Ishikawa

Fuente: Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma - Elaboración propia

4.2.2. Mapa de Procesos – Segundo Nivel.

En el mapa de procesos-segundo nivel (figura 18) se detallan los parámetros que se controlan en cada etapa del proceso, llamados variables independientes (x's), los cuales influyen en los productos de cada etapa del proceso que vienen a ser las variables dependientes (y's). En otras palabras, los y's en función de las x's. Al ser una etapa de flotación, las variables que intervienen en este proceso son el potencial óxido reducción (ORP), el porcentaje de la abertura de las válvulas de aire, los perfiles de las celdas de flotación conocido también como el colchón de espumas, el porcentaje de sólidos, velocidades de las bombas y los flujos de alimentación. Es importante mencionar que en la figura 18 solo se muestran las variables que contaban con un instrumento de medición.

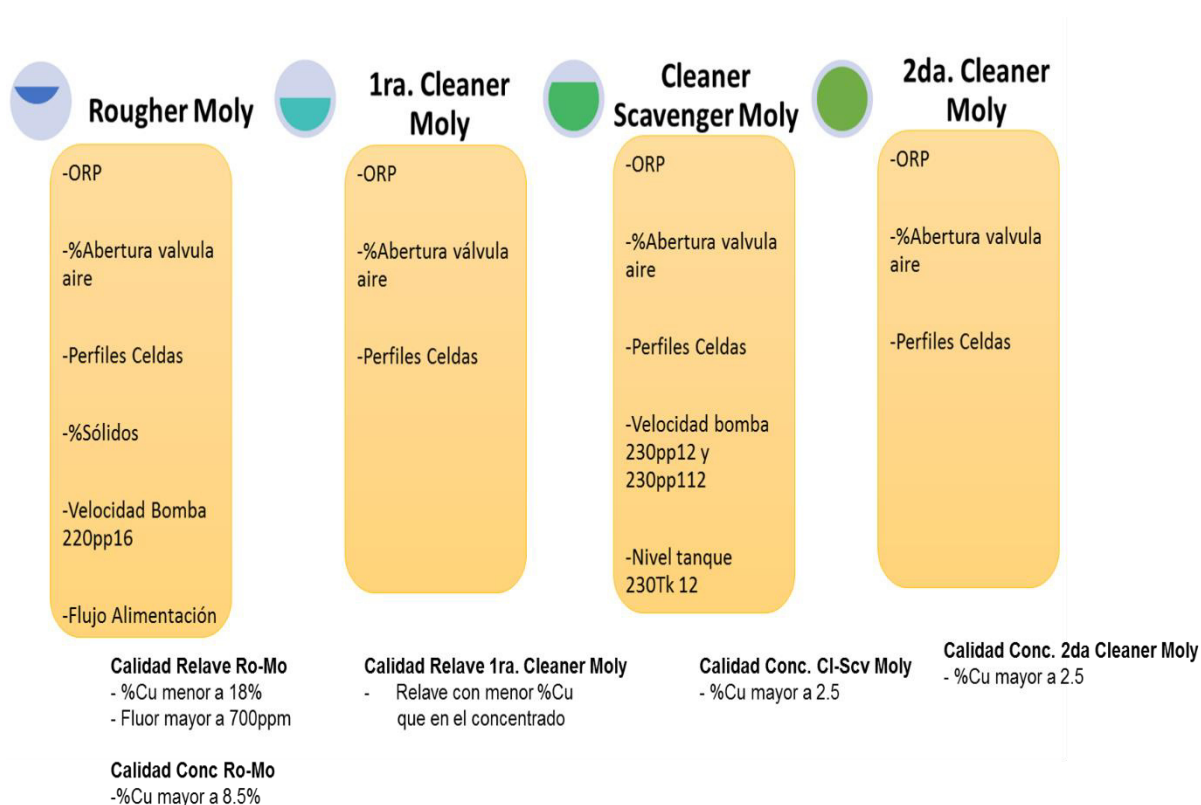


Figura 18. Mapa de Procesos – Segundo Nivel

Fuente: Elaboración propia

Además, en el mapa de procesos – segundo nivel, se muestran los modos de falla para cada

etapa del proceso, los cuales son las características que no deben tener los productos de cada etapa (y's).

En la etapa rougher, se tienen 6 parámetros a controlar con 3 modos de falla. En el relave rougher (concentrado de cobre) el grado de cobre no debe ser menor a 18% ya que sino el concentrado no es comercializable y el flúor no debe sobrepasar los 700ppm porque las penalidades económicas aumentan. En el concentrado rougher el grado de cobre no debe ser mayor a 8.5% con la finalidad de no perder cobre en esta etapa.

En el caso de la etapa 1ra. cleaner, el modo de falla se da cuando el grado de cobre en el relave es menor al grado de cobre en el concentrado. Es necesario recordar que es un proceso donde se aplica la flotación inversa, así mismo según el diagrama SIPOC (figura 13) y el flowsheet (figura 14), el relave 1ra. cleaner retorna a la etapa rougher y de no controlarse la contaminaría.

Respecto al cleaner scavenger y 2da. cleaner, al ser las últimas etapas del proceso se requiere que el grado de cobre en sus concentrados sea lo mínimo posible teniendo como límite máximo 2.5%, esto con la finalidad de reducir las pérdidas del cobre en el proceso.

4.2.3. FMEA/ANFE.

Una vez realizado el diagrama de Ishikawa (figura 17) y el mapa de procesos - segundo nivel (figura 18), estas informaciones se consolidaron en el FMEA (figura 19) con la finalidad de identificar las etapas más riesgosas del proceso donde pueden ocurrir los modos de falla según sus RPN (Número Prioritario de Riesgo) y así aplicar una acción opcional, recomendada u obligatoria. Cada modo de falla ocasionará un efecto de falla por lo que fue necesario medir

su severidad también en un rango de valores de 1 al 10 considerando a 1 como no severo y 10 como severo muy peligroso. Así también fue necesario conocer las causas más probables, según el diagrama de Ishikawa, que ocasionaron los modos de fallas y su nivel de ocurrencia igualmente con valores de 1 al 10 considerando a 1 como ocurrencia remota y 10 como ocurrencia probable muy alta. Adicionalmente, también fue necesario conocer el nivel de detección de las causas teniendo en cuenta los controles ya aplicados, asimismo se consideró valores de 1 al 10 donde 1 es considerado como detección casi cierta y 10 como incertidumbre. Por consiguiente, los RPN están en función a la severidad, ocurrencia y detección.

Part/process	Failure Mode	Failure Effects	S E V	Causes	O C C	Controls	D E T	R P N
ROUGHER MOLY	%Cu menor a 18%	El cobre no es comercializable	10	Variabilidad del mineral	9	Seguimiento del %Cu en los circuitos anteriores	5	450
			10	Parámetros del proceso	9	Monitoreo constante	6	540
			10	Errónea lectura del Courier	5	Contraste de datos con ensayos químicos	3	150
	Fluor mayor a 700ppm	Penalizaciones en la comercialización	10	Variabilidad del mineral	9	Seguimiento del %Cu en los circuitos anteriores	5	450
			10	Parámetros del proceso	9	Monitoreo constante	6	540
			9	Capacidad de equipos	5	Monitoreo de alimentación del circuito	3	135
	Concentrado Ro-Mo con %Cu mayor a 8.5%	Pérdidas de Cu en el Ro-Mo	8	Errónea lectura del Courier	5	Contraste de datos con ensayos químicos	3	120
1ra. CLEANER MOLY	Relave con menor %Cu que en el concentrado	Disminuye el %Cu en el alimento Ro-Mo	8	Distracción del operador	3	Platicar con el operador de lo sucedido	1	24
CLEANER SCAVENGER MOLY	Conc. mayor 2.5%Cu	Pérdidas de Cu en el circuito	8	Errónea lectura del Courier	5	Contraste de datos con ensayos químicos	3	120
			8	Parámetros del proceso	6	Monitoreo constante	4	192
2da. CLEANER MOLY	Conc. mayor 2.5%Cu	Pérdidas de Cu en el circuito	8	Errónea lectura del Courier	5	Contraste de datos con ensayos químicos	3	120
			8	Parámetros del proceso	6	Monitoreo constante	4	192

Figura 19. Consolidado FMEA/ANFE

Fuente: Elaboración propia

Primero, en la etapa Rougher, en su relave, no se deseó que tenga un grado de cobre menor a 18% y un contenido de flúor mayor a 700ppm porque genera un concentrado no comercializable. Las causas que generaron este problema en el concentrado se debieron a la variabilidad del mineral y a un mal control de los parámetros del proceso por lo que se hicieron seguimientos de cómo estaba el grado de cobre en los circuitos anteriores de modo que cuando ingrese al circuito se puedan ajustar los parámetros a controlar. Hay que tener en cuenta que por lo general esto sucedía muy seguido lo cual se volvió muy crítico y se debían tomar acciones obligatorias. Por otro lado, en ocasiones donde el Courier brindaba un desfase en el grado de cobre; sin embargo, la ocurrencia de este suceso no fue alta ya que continuamente se contrastaron aquellos datos con los ensayos químicos. Según sus RPN se debían tomar acciones opcionales como por ejemplo una calibración del Courier más seguida.

Segundo, en la 1ra. cleaner, si no se controlaba bien esta etapa su relave contaminaba al rougher y esto se debía por lo general a la confianza y/o distracción del operador en la operación del proceso; si bien es cierto, no fue cotidiano pero puede volver a suceder por lo que se recomendó retroalimentar al operador respecto a su comportamiento en la operación.

Tercero, la cleaner scavenger y 2da cleaner no debían tener un grado de cobre mayor a 2.5 en el concentrado y esto era ocasionado por los parámetros de los procesos que eran inadecuados. Además, de un error en la lectura del Courier que se pudo controlar con los contrastes de ensayos químicos.

De todos los modos de falla, según su severidad, ocurrencia y su detección los más importantes son los parámetros de procesos seguido por la variabilidad del mineral en la etapa rougher porque un mal control perjudica la calidad del concentrado de cobre.

Debido a esto, se deben tomar acciones obligatorias y una de ellas es establecer parámetros ideales de operación.

4.2.4. Validación del Sistema de Medición.

Como se explicó en el punto 4.1.5, el %masspull fue la métrica con el cuál se cumplirá el requerimiento del cliente; como consecuencia, esta métrica se utilizará más adelante para medir la capacidad del proceso y realizar el análisis de datos. Debido a esto, fue necesario hacer un estudio R&R del %masspull con la finalidad de validar la calidad de los datos y comprobar que la variabilidad es propia del proceso y no del error del humano y/o instrumento de medición.

Se realizó el R&R de la siguiente manera:

- Se recolectaron 3 tipos de muestras por 7 días: alimento rougher, relave rougher (concentrado de cobre) y el compósito del concentrado de cleaner scavenger y 2da. cleaner (concentrado talco). Esto a causa que el %masspull está en función al grado de cobre de las muestras mencionadas líneas arriba.
- Seguidamente se eligieron al azar a 4 operadores de laboratorio químico y a cada uno se les entregó las muestras por igual. De modo que cada operador tuvo 7 muestras de alimento rougher, 7 muestras de relave rougher y 7 muestras del compósito del concentrado de cleaner scavenger y 2da. cleaner.
- Posteriormente se ordenó realizar el ensayo químico para determinar el grado de cobre de cada una de estas muestras.
- Por último, obtenido los resultados del ensayo químico se calculó el %masspull de los 7 días para los 4 operadores.

Estudio R&R del sistema de medición - Método XBarra/R

Componentes de la varianza

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.03058	0.94
Repetibilidad	0.02904	0.89
Reproducibilidad	0.00154	0.05
Parte a parte	3.22621	99.06
Variación total	3.25679	100.00

Evaluación del sistema de medición

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.17488	1.0493	9.69
Repetibilidad	0.17042	1.0225	9.44
Reproducibilidad	0.03923	0.2354	2.17
Parte a parte	1.79616	10.7770	99.53
Variación total	1.80466	10.8279	100.00

Figura 20. Informe estadístico R&R del %MassPul

Fuente: Elaboración propia

El informe estadístico (figura 20) se evaluó lo siguiente:

- Primero, en la tabla de Componentes de la varianza, se evaluó la variación de cada fuente del error con la variación total; en este caso, la variación entre las partes es 99.06%, mayor al error del Gage R&R Total (0.94%); por lo tanto, la gran parte de la variación se debe a las diferencias entre las partes.
- Segundo, en la tabla Evaluación del sistema de medición, se comparó la variación del sistema de medición con la variación total; en este caso, el %Var. estudio (%VE) del Gage R&R Total fue 9.69%, siendo menor a 10%.

Es necesario acotar que en el informe estadístico (figura 20) en la columna “fuente” se menciona “parte a parte”; sin embargo, para nosotros es considerado día a día ya que en el procedimiento se recolectaron muestras por 7 días seguidos.

Cabe mencionar que para aceptar un estudio R&R se hace respecto al %VE, y este debe seguir ciertos criterios los cuales se mencionan en la tabla 3.

Tabla 3

Criterios para analizar un estudio R&R

ELEMENTO	DECISIÓN
Inferior a 10%	Es considerado un sistema de medición aceptable
Entre 10% y 30%	Puede ser considerado aceptable en algunas aplicaciones
Superior a 30%	Es considerado como inaceptable

Fuente: Measurement Systems Analysis Work Group

Adicionalmente, en la figura 21 se validó gráficamente el informe estadístico:

- Primero, en la gráfica componentes de variación se observó al R&R del sistema de medición muy por debajo del %Var. Estudio correspondiente a “parte a parte”.
- Segundo, en la gráfica %masspull por Día se observó la variabilidad del día a día del %masspull.
- Tercero, en la gráfica %masspull por Operador, se observó gran similitud de los operadores al momento de trabajar.
- Por último, en la gráfica Interacción Día*Operador, la variabilidad es debido a los días del proceso y no a los operadores.

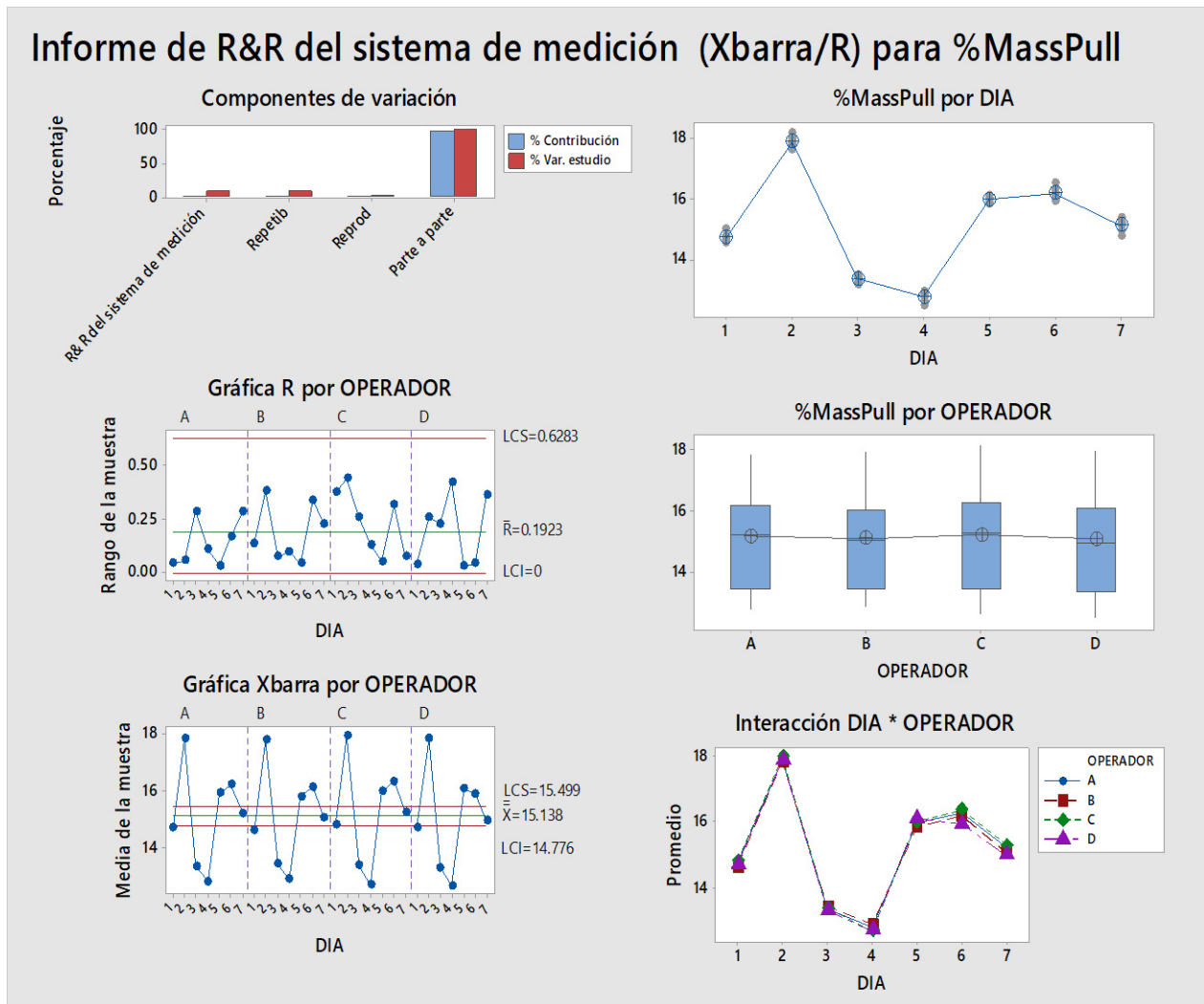


Figura 21. Informe gráfico R&R del %masspull

Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Capacidad del Proceso.

Continuando con la metodología Six Sigma, ya realizado el estudio R&R se procedió a medir el nivel de capacidad en el nivel sigma (σ) con el objetivo que saber cuál era la realidad del proceso. El nivel sigma se midió en función al %masspull (variable Y) por lo cual se trabajó con una base de datos que fue recolectada por 5 meses, 2 veces al día (turno mañana y noche) con una operación de la planta concentradora de 24 horas diarias. Para realizar el nivel de capacidad del actual proceso fue necesario seguir 3 pasos:

- Prueba de normalidad

- Prueba de estabilidad
- Medición de capacidad

Prueba de Normalidad

En la prueba de normalidad se buscó que el valor p del %masspull sea mayor al 0.05. En caso contrario, era necesario aplicar una transformación estadística al %masspull con la finalidad de identificar la distribución que seguía.

Al realizarse la prueba de normalidad de Anderson – Darling (figuras 22 y 23) el valor p obtenido fue de 0.814, por lo tanto afirma que el %masspull sigue una distribución normal. Adicionalmente, el %masspull tiene una media y mediana muy similar, 8.1754 y 8.1789 respectivamente.

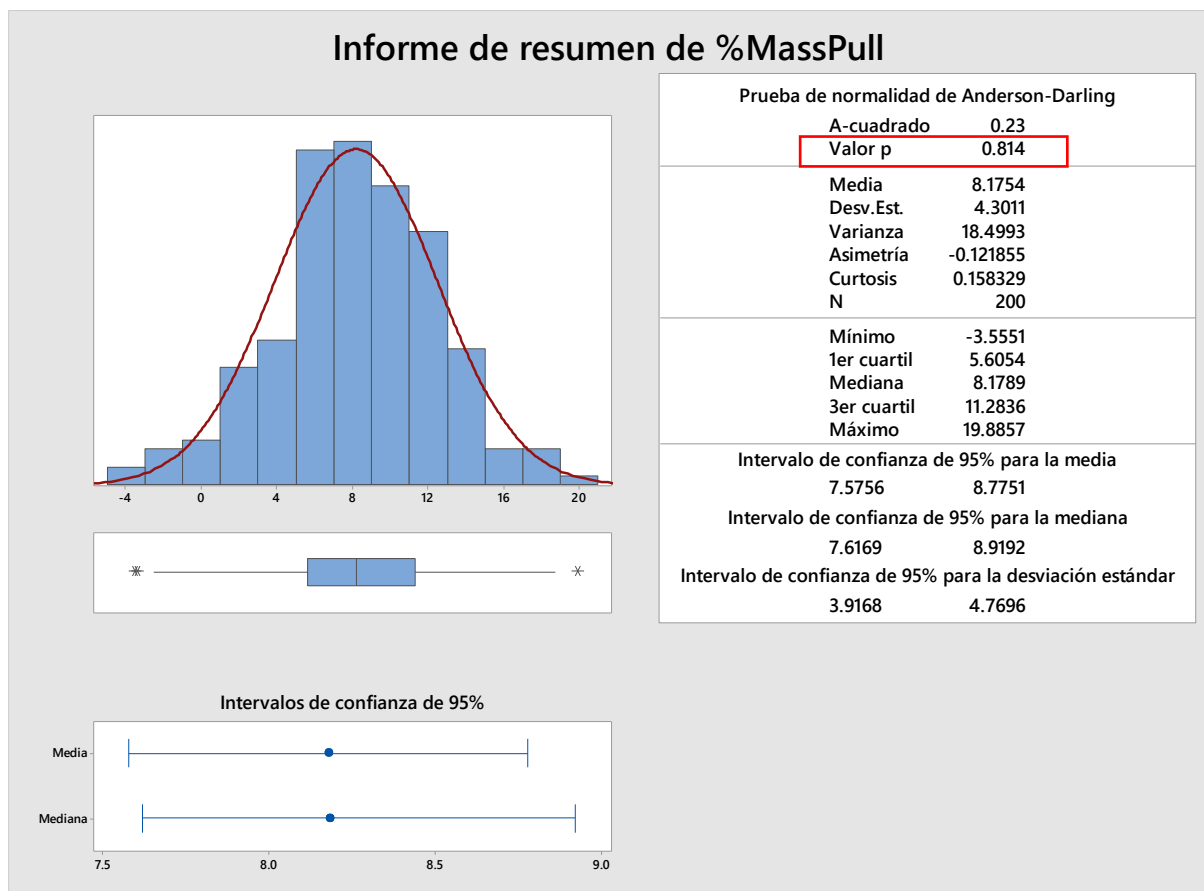


Figura 22. Resumen gráfico del %masspull

Fuente: Elaboración propia

Por último, también se realizó una prueba gráfica donde los datos recolectados del %masspull tienden a seguir una tendencia lineal (figura 23), los datos del histograma presentan una forma acampanada y la gráfica de caja se encuentra centrada (figura 22) los cuales son características propias de valores con distribución normal.

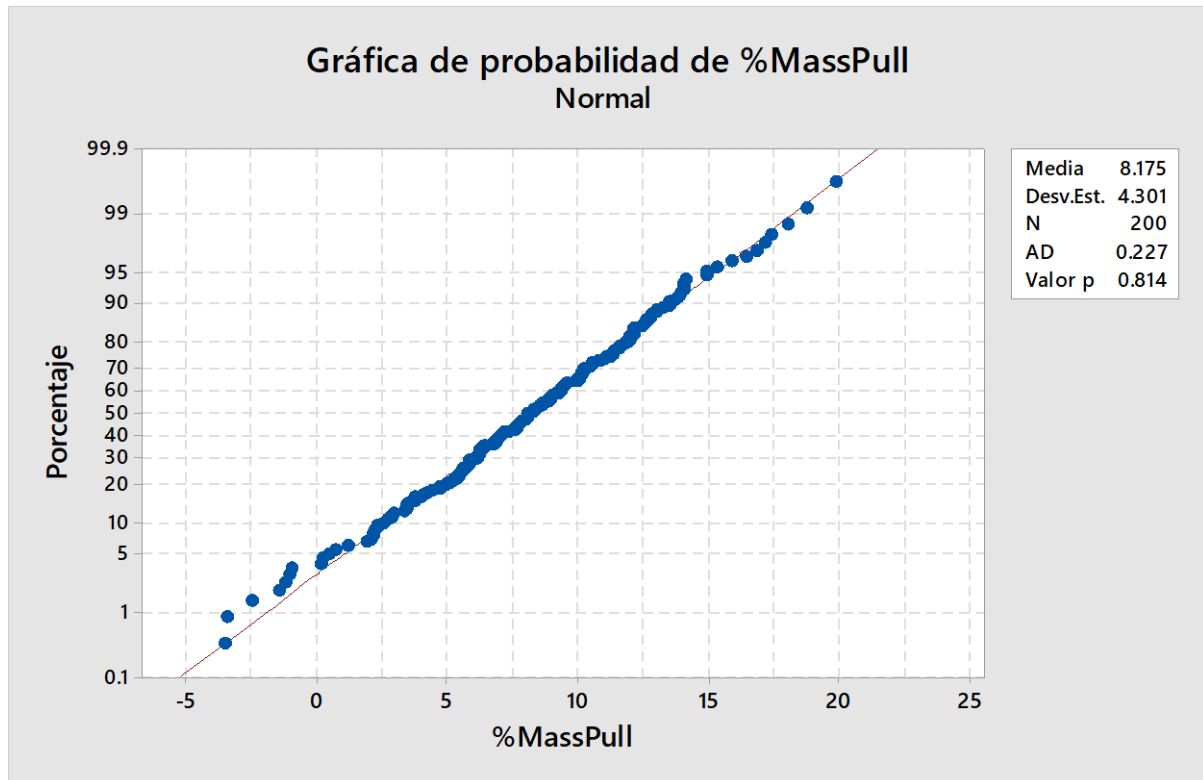


Figura 23. Gráfica de probabilidad de la normalidad del %masspull

Fuente: Elaboración propia

Prueba de Estabilidad

Luego de realizarse la prueba de normalidad, el siguiente paso a seguir para poder medir la capacidad del proceso fue comprobar la estabilidad del %masspull a lo largo del tiempo. Como se recolectaron datos del turno mañana y noche, se decidió calcular la estabilidad del proceso por día.

En la figura 24, se muestra el %masspull dentro de los límites de control los cuales fueron

calculados por el mismo software estadístico; además, al no encontrar algún tipo de ruido a lo largo del tiempo, se afirmó que el proceso se encontró bajo control estadístico y que ya se puede medir su capacidad.

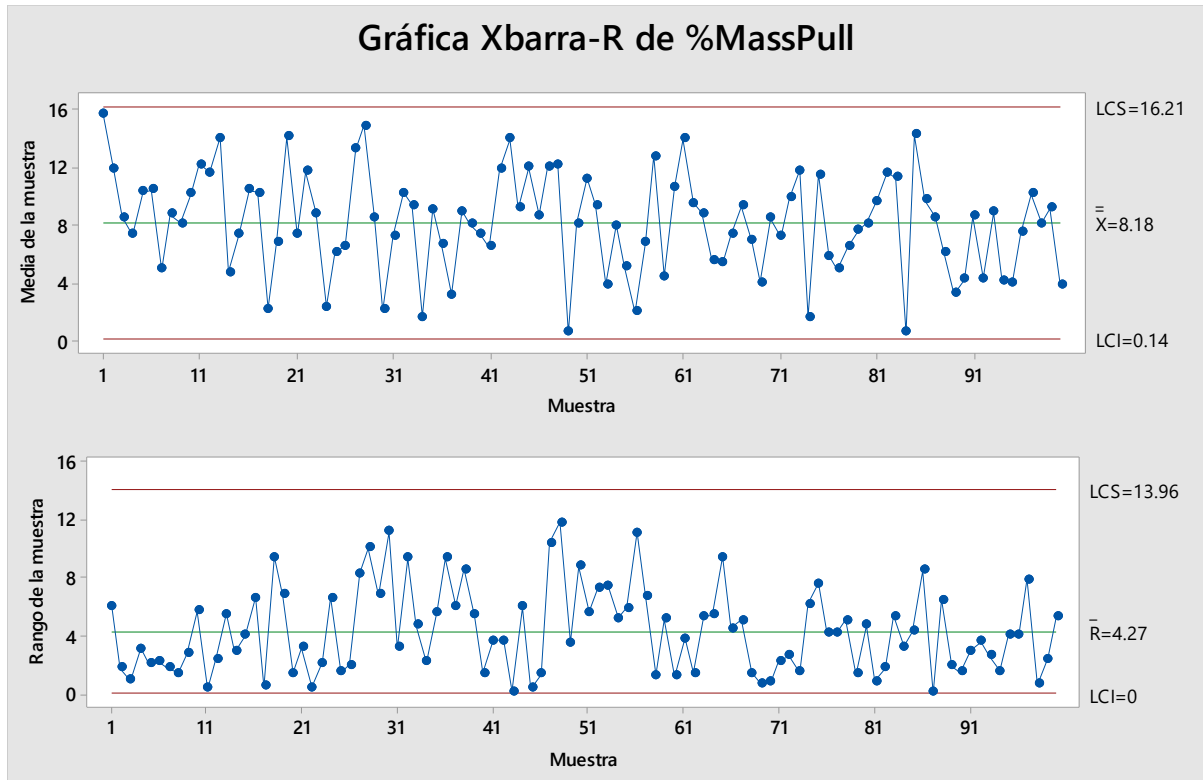


Figura 24. Gráfica \bar{X} -R del %masspull

Fuente: Elaboración propia

Medición de Capacidad

Luego de hacer las pruebas de normalidad y estabilidad, se procedió a realizar la medición de capacidad o nivel sigma del proceso donde se consideró como límite inferior (LEI) que debía de tener el %masspull a 11% (ver figura 15) dando como resultado una capacidad o nivel sigma (Nivel Z) de largo plazo de -0.66 y una capacidad de corto plazo de -0.70. Al ser valores negativos y tener 74% (generalmente la unidad de medida es en partes por millón pero para un mejor entendimiento se utilizó en porcentaje) de datos observados significa que el proceso se encontró muy por debajo de la especificación, por lo que a nivel de operaciones no hubo alguna acción o un buen control para incrementar el %masspull. Sin embargo, al observar las líneas

de largo y corto plazo que se encuentran sobre histograma, se podría decir que el proceso es estable porque dichas líneas están casi superpuestas una a la otra. Ver figura 25

En consecuencia, el proceso fue considerado como estable y no capaz.

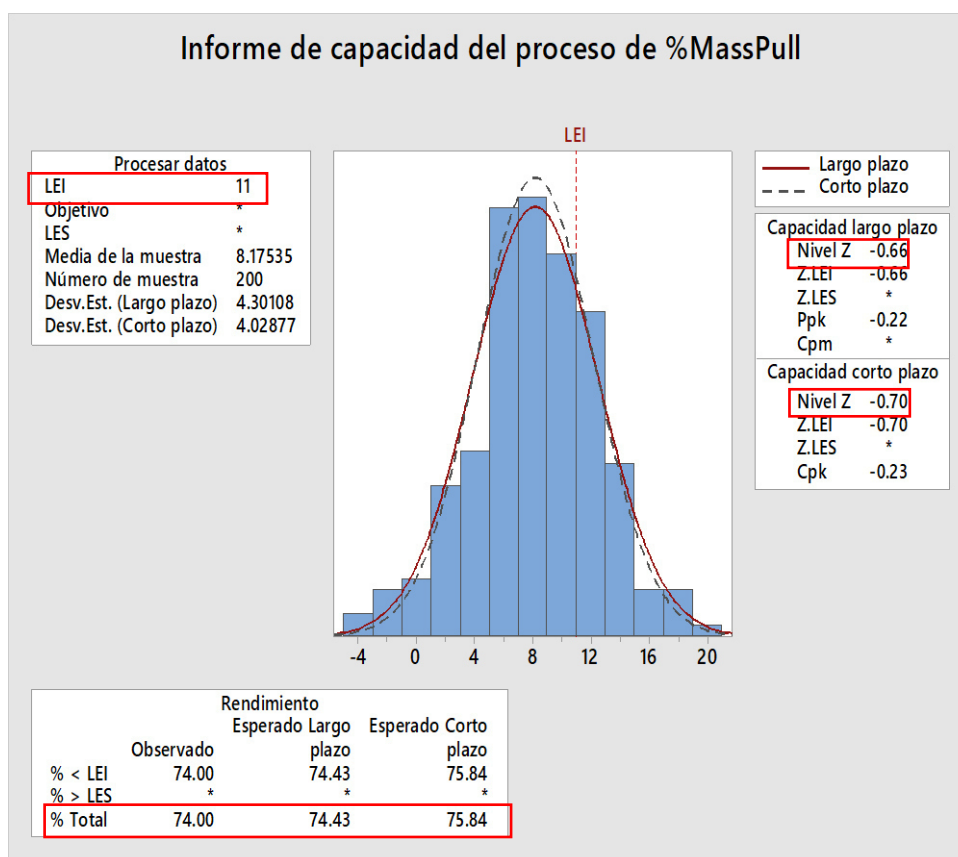


Figura 25. Informe de capacidad del proceso del %masspull

Fuente: Elaboración propia

4.3. Fase Analizar

Concluida la fase anterior. En esta oportunidad la fase analizar consistirá en realizar un análisis estadístico más profundo cuyo objetivo es identificar las variables(x's) más importantes que afectan en el %masspull (Y) del proceso. Como se dijo anteriormente, es necesario recordar que el %masspull está en función al alimento rougher moly, relave rougher moly (concentrado cobre) y el compósito del concentrado de cleaner scavenger moly y 2da. cleaner moly(concentrado talco).

A consecuencia que el %masspull está compuesto por 2 productos fue necesario hacer un análisis independiente de cada variable para identificar cuál de los 2 productos o si ambos afectaban al %masspull.

Concentrado Cu vs %MassPull

Se realizó una regresión lineal donde se hizo un análisis estadístico y un análisis gráfico.

En el análisis estadístico se obtuvo lo siguiente:

- La correlación de Pearson (figura 26) tuvo un valor de 0.825. Al ser un valor positivo y muy cercano a 1 significa que el concentrado Cu tiene una correlación buena y es directamente proporcional respecto al %masspull. Finalmente se obtuvo un valor p de 0.000 el cual aseguró estadísticamente la existencia de la correlación con una confianza de 95%.



Figura 26. Informe estadístico de correlación entre Concentrado Cu vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

- En el análisis de varianza (ANOVA), el concentrado Cu tuvo un valor F de 121.07 y un valor p de 0.000 igual a la correlación de Pearson.
- En el resumen del modelo, se obtuvo un R –cuadrado (ajustado) de 67.43% lo cual explica el aporte del concentrado Cu al %masspull
- En los coeficientes, se comprobó la independencia de la variable “x” (concentrado Cu) respecto a la variable dependiente “Y” (%masspull), obteniendo un FIV de 1 lo cual fue estadísticamente perfecto. Ver figura 27
- Ante lo explicado, la regresión es estadísticamente significativa.

Análisis de regresión: %MASSPULL vs. %Cu - CONC. Cu

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	1402.27	1402.27	121.07	0.000
%Cu - CONC. Cu	1	1402.27	1402.27	121.07	0.000
Error	57	660.19	11.58		
Falta de ajuste	54	653.86	12.11	5.74	0.087
Error puro	3	6.33	2.11		
Total	58	2062.46			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3.40328	67.99%	67.43%	65.64%

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-41.30	5.34	-7.73	0.000	
%Cu - CONC. Cu	2.933	0.267	11.00	0.000	1.00

Ecuación de regresión

$$\%MASSPULL = -41.30 + 2.933 \%Cu - CONC. Cu$$

Figura 27. Informe estadístico de la regresión entre Concentrado Cu vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

En el análisis gráfico se observó lo siguiente:

- A medida que el concentrado Cu aumentó, el %masspull incrementó por lo que corroboró el análisis estadístico donde se dijo que el concentrado de Cu es directamente proporcional al %masspull. Ver figura 28

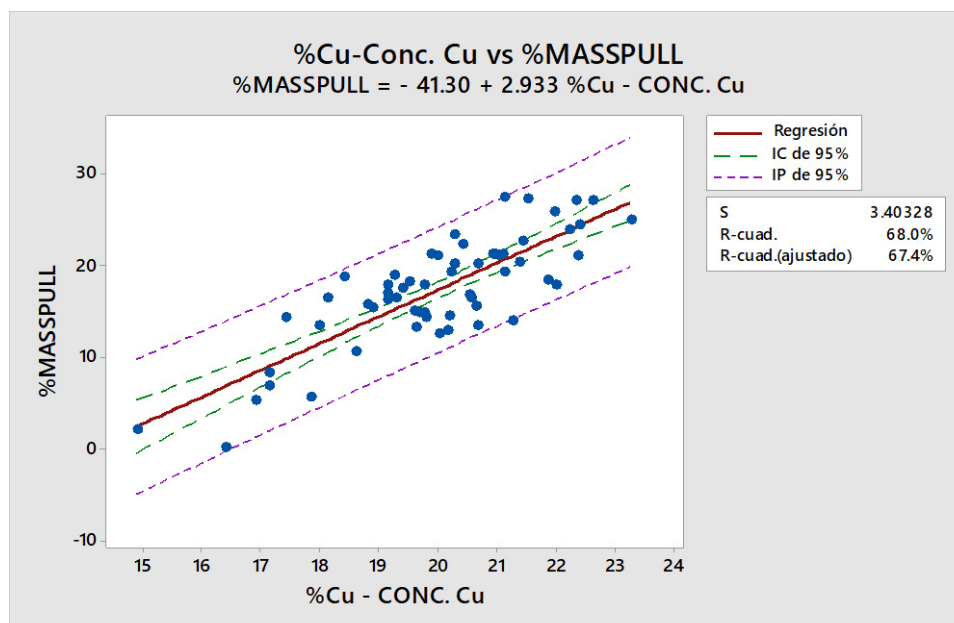


Figura 28. Gráfica de regresión entre Concentrado Cu vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

- Respecto a la figura 29, específicamente en la gráfica de probabilidad normal, se mostró que los residuos siguen una distribución normal el cual se validó con el histograma. Además, la gráfica de residuos versus ajustes y la gráfica residuos versus orden de observaciones se observaron que estas no seguían tendencia alguna corroborando el análisis gráfico.

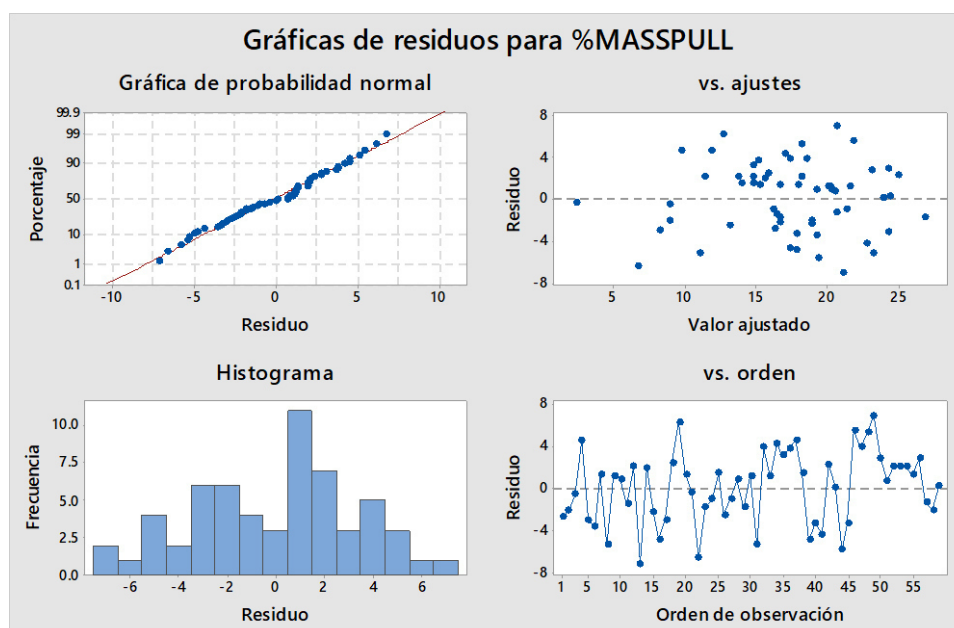


Figura 29. Gráfica de residuos de la regresión entre Concentrado Cu vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

Concentrado Talco vs %MassPull

Se realizó una regresión lineal donde se hizo un análisis estadístico y un análisis gráfico.

En el análisis estadístico se obtuvo lo siguiente:

- La correlación de Pearson (figura 30) tuvo un valor de 0.019. Al ser un valor muy cercano a 0.000 significa que el concentrado talco no tiene correlación con el %masspull. Finalmente se obtuvo un valor p de 0.884 lo cual aseguró estadísticamente la no existencia de la correlación con una confianza de 95%.



Figura 30. Informe estadístico de correlación entre concentrado talco vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

- En el análisis de varianza (ANOVA), el concentrado talco tuvo un valor F de 0.02 y un valor p de 0.884 igual a la correlación de Pearson.
- En el resumen del modelo, se obtuvo un R –cuadrado (ajustado) de 0.00% lo cual explica el no aporte del concentrado talco al %masspull. En los coeficientes, se comprobó la independencia de la variable “x” (concentrado talco) respecto a la variable dependiente “Y” (%masspull), obteniendo un FIV de 1 lo cual fue estadísticamente perfecto. Ver figura 31
- Ante lo explicado, la regresión no es estadísticamente significativa.

Análisis de regresión: %MASSPULL vs. %Cu - Conc. Talco

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	0.78	0.7826	0.02	0.884
%Cu - Conc. Talco	1	0.78	0.7826	0.02	0.884
Error	57	2061.68	36.1698		
Falta de ajuste	55	2042.75	37.1409	3.92	0.224
Error puro	2	18.93	9.4649		
Total	58	2062.46			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
6.01414	0.04%	0.00%	0.00%

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	16.48	5.50	3.00	0.004	
%Cu - Conc. Talco	0.32	2.14	0.15	0.884	1.00

Ecuación de regresión

$$\%MASSPULL = 16.48 + 0.32 \%Cu - Conc. Talco$$

Figura 31. Informe estadístico de la regresión entre concentrado talco vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

En el análisis gráfico se observó lo siguiente:

- No existió correlación directa o inversa del %masspull respecto al concentrado talco por lo que corroboró el análisis estadístico donde se dijo que no existe correlación alguna entre el concentrado de talco y el %masspull. Ver figura 32.

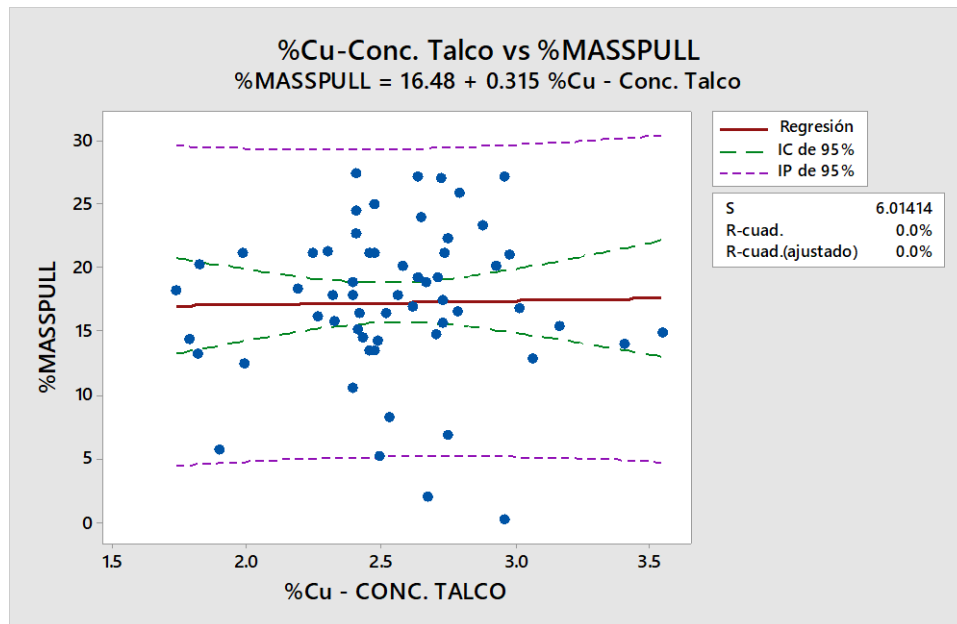


Figura 32. Gráfica de regresión entre Concentrado Talco vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

- Respecto a la figura 33, específicamente en la gráfica de probabilidad normal, se mostró que los residuos siguen una distribución normal el cual se validó con el histograma. Además, la gráfica de residuos versus ajustes y la gráfica residuos versus orden de observaciones se observaron que estas no seguían tendencia alguna corroborando el análisis gráfico.

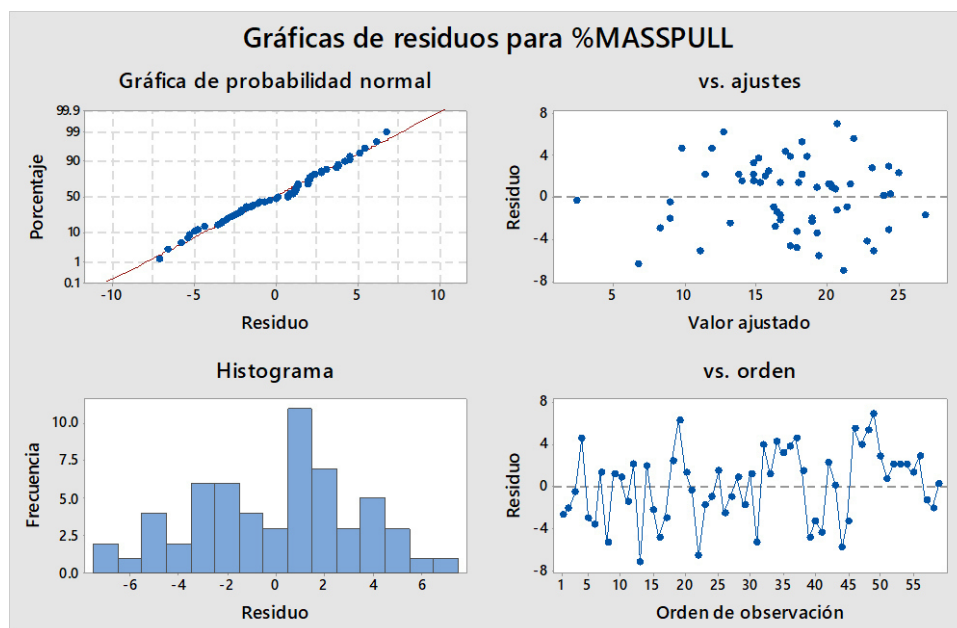


Figura 33. Gráfica de residuos de la regresión entre Concentrado Talco vs %masspull

Fuente: Elaboración propia

Como consecuencia de lo hallado en la matriz causa-efecto (figura 12) en la etapa definir, el FMEA (figura 19) en la fase medir donde se observó los mayores RPN en el etapa rougher teniendo como causa principal los parámetros del proceso; y la correlación del concentrado Cu versus el %masspull explicado anteriormente; se procedió a ejecutar un análisis más detallado de los parámetros de control de la etapa rougher al ser la etapa que más impacto genera en el %masspull. En el mapa de procesos – 2do. nivel (figura 18) se detallaron los parámetros de la etapa rougher.

Tabla 4

Evaluación parámetros rougher

X's		Y
1.	%Sólidos	%Masspull
2.	Flujo de alimentación	
3.	Perfiles de celdas	
4.	%Abertura válvulas de aire	
5.	ORP	

Cabe mencionar que no se consideró a la velocidad de la bomba 220pp16 como parámetro a evaluar en la tabla 4, debido que este parámetro guarda relación directa con el flujo de alimentación.

Análisis del %Sólidos y Flujo de Alimentación

Se realizó el análisis para los 2 primeros parámetros de forma independiente, donde se observó que el %masspull se elevó cuando el %sólidos era de 30% a 36%. Además, también se observó que mientras mayor sea el %sólidos el %masspull disminuía. Por otro lado, el flujo de alimentación cuando era menor a 200m³/hr el %masspull disminuyó y perjudicó la última celda de flotación debido que no llegaba suficiente pulpa y era muy complicado de efectuar la flotación; sin embargo, el %masspull llegó a su punto máximo con un flujo de alimentación de 230 m³/hr a 290 m³/hr. No obstante, cuando el flujo de alimentación fue mayor a 290 m³/hr

sobrepasó la capacidad de la celda y originó rebalses en el tanque 230Tk017 el cual recepcionaba el concentrado rougher. Ver figura 34.

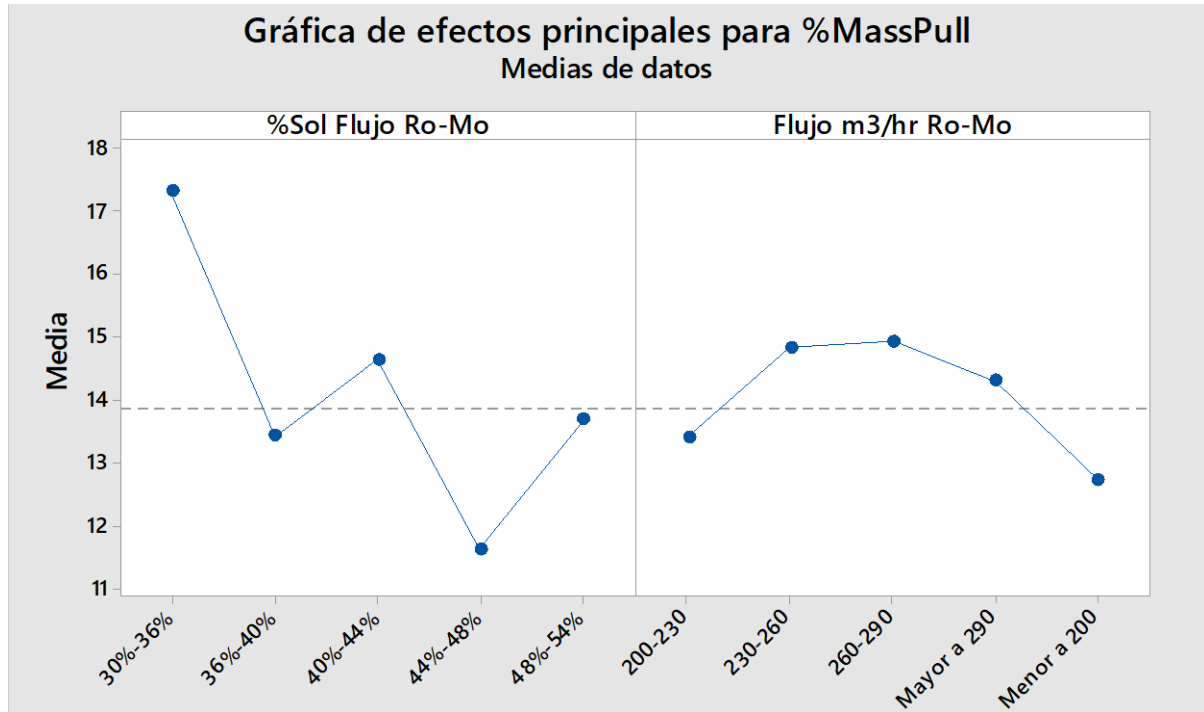


Figura 34. Gráfica de efectos principales del %sólidos y flujo de alimentación para el %masspull.

Fuente: Elaboración propia.

A causa que el %sólidos y el flujo de alimentación son 2 parámetros que van de mano, se decidió hacer un análisis en conjunto como se muestra en la figura 35. Se observó los valores más altos del %masspull cuando se trabajó a un %sólidos de 30%-36%, corroborando el análisis independiente; y a la vez trabajando con un flujo de alimentación de 200 m³/hr a 260 m³/hr, cambiando su análisis independiente.

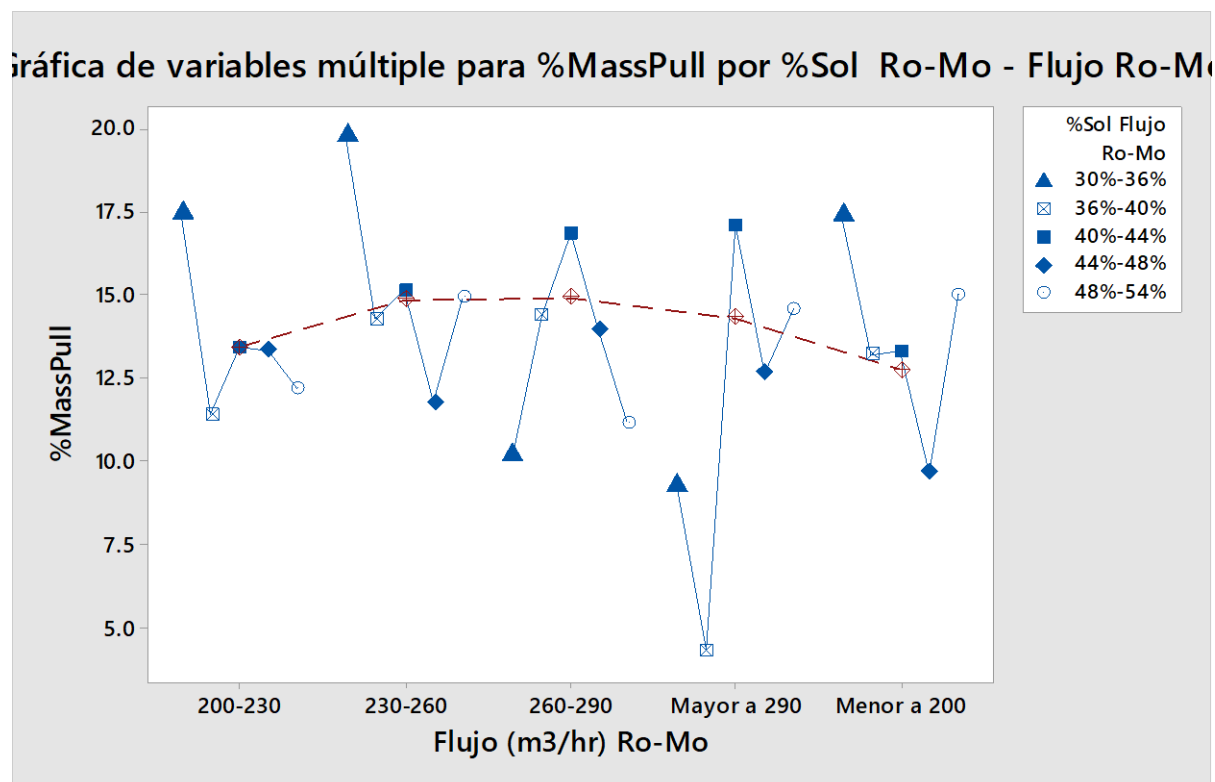


Figura 35. Gráfica multivariable del %sólidos y flujo de alimentación para el %masspull.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de %Colchón de Espumas y %Abertura de válvula de aire

Debido que el %masspull significa retirar masa, en otras palabras flotar mineral, hay dos parámetros con los cuales se pueden controlar que son los perfiles de las celdas de flotación, también conocido como colchón de espumas, y la abertura de las válvulas de aire (los 2 expresados en porcentaje).

Como consecuencia a lo anterior, el siguiente parámetro a evaluar fue los perfiles de las celdas de flotación. Se observó los perfiles de las 3 primeras celdas eran muy similares con una leve tendencia a disminuir; en cambio, el perfil de la última celda de flotación tuvo una gran variabilidad respecto a las otras 3. Llegando a valores muy cercanos a 0% hasta 100%, esto debido a la gran variabilidad en el flujo de alimentación, lo cual constata los efectos y consecuencias de este parámetro en el proceso. Ver figura 36.

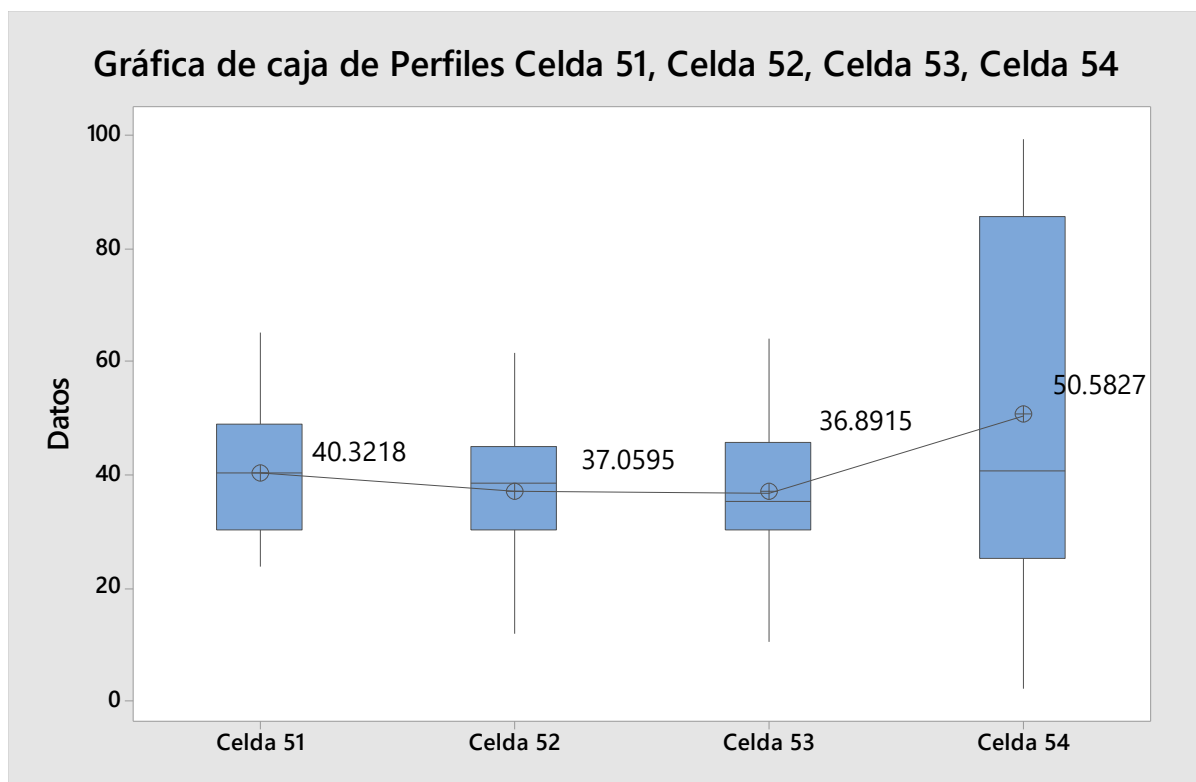


Figura 36. Gráfica de cajas de los perfiles de las celdas de flotación

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se analizó las aberturas de las válvulas de aire (figura 37) donde se observó la gran similitud en las 4 celdas. No obstante, la cantidad de aire que ingresa a las celdas de flotación está en relación a los perfiles ya que se puede retirar masa en la flotación ya sea aumentando la cantidad de aire, reduciendo el colchón de espumas y/o viceversa.

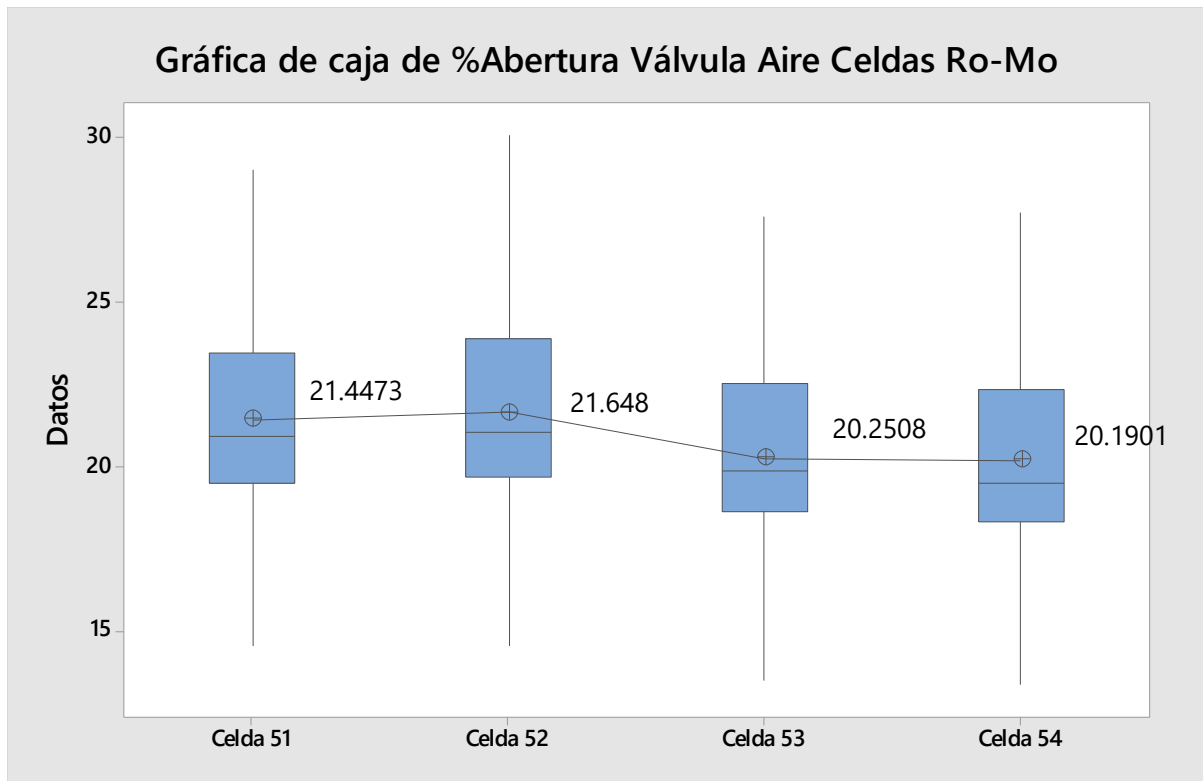


Figura 37. Gráfica de cajas de %apertura de válvula de aire de las celdas de flotación.

Fuente: Elaboración propia.

Ante lo expuesto, se vio en la necesidad de hallar el equilibrio entre estos 2 parámetros, realizando un cálculo matemático tal como se muestra en las ecuaciones 2 y 3, donde se priorizó solo las 2 primeras celdas de flotación de la etapa rougher moly porque metalúrgicamente eran las que generaban mayor impacto en la flotación.

$$\text{Relación 1} = \frac{\text{Perfil Celda 51}}{\text{Abertura Válvula de aire Celda 51}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Relación 2} = \frac{\text{Perfil Celda 52}}{\text{Abertura Válvula de aire Celda 52}} \dots\dots\dots (\text{Ec. 3})$$

Una vez hecho el cálculo, se identificó que la relación ideal de estos 2 parámetros estaba en el rango de 1 a 1.4 donde se obtuvo un %masspull superior. Mientras mayor fue la relación, el %masspull disminuyó. Ver figura 38.

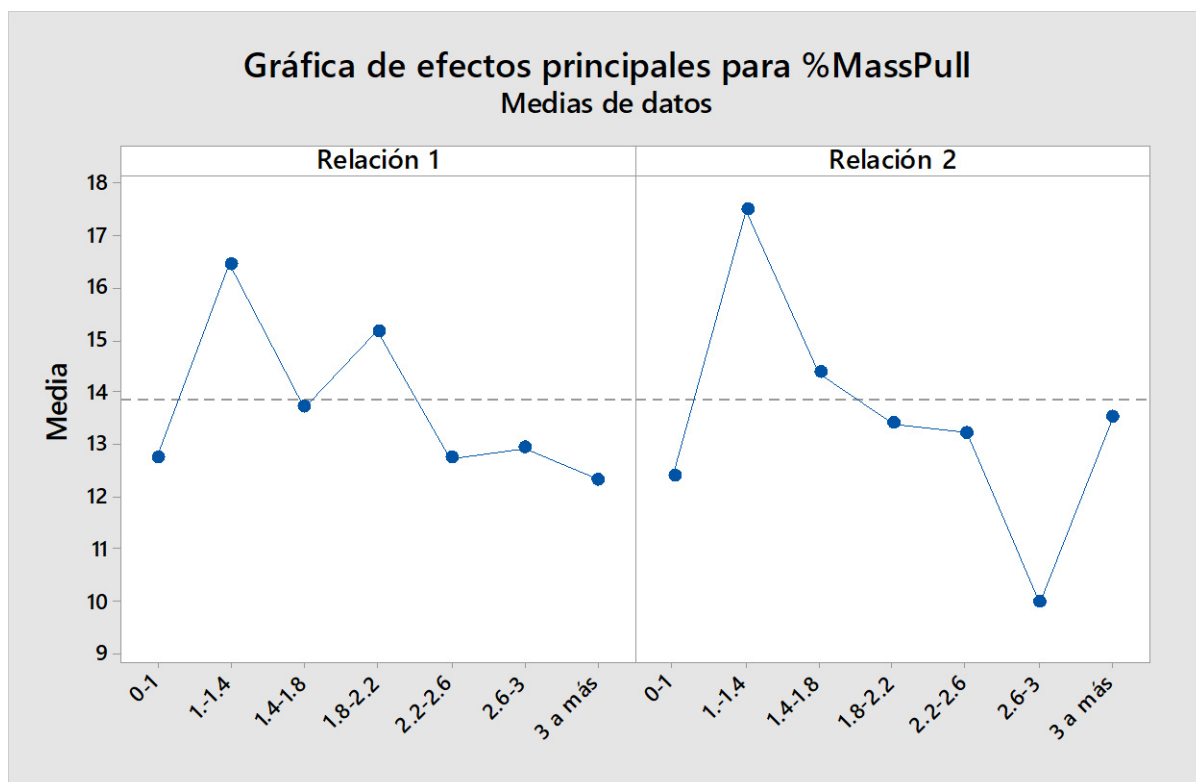


Figura 38. Gráfica de efectos principales de la relación Perfil/Abertura Válvula de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis del Potencial de Óxido Reducción (ORP)

El último parámetro que se evaluó fue el potencial de óxido reducción (ORP) con el cual se controlaba la depresión del cobre al ser una flotación inversa. Se decidió evaluar el ORP que ingresaba la pulpa a la etapa rougher.

En la figura 39 se observó que cuando se trabajó a un ORP de -520mV a -560mV se obtuvo un %masspull mayor en comparación a otros rangos.

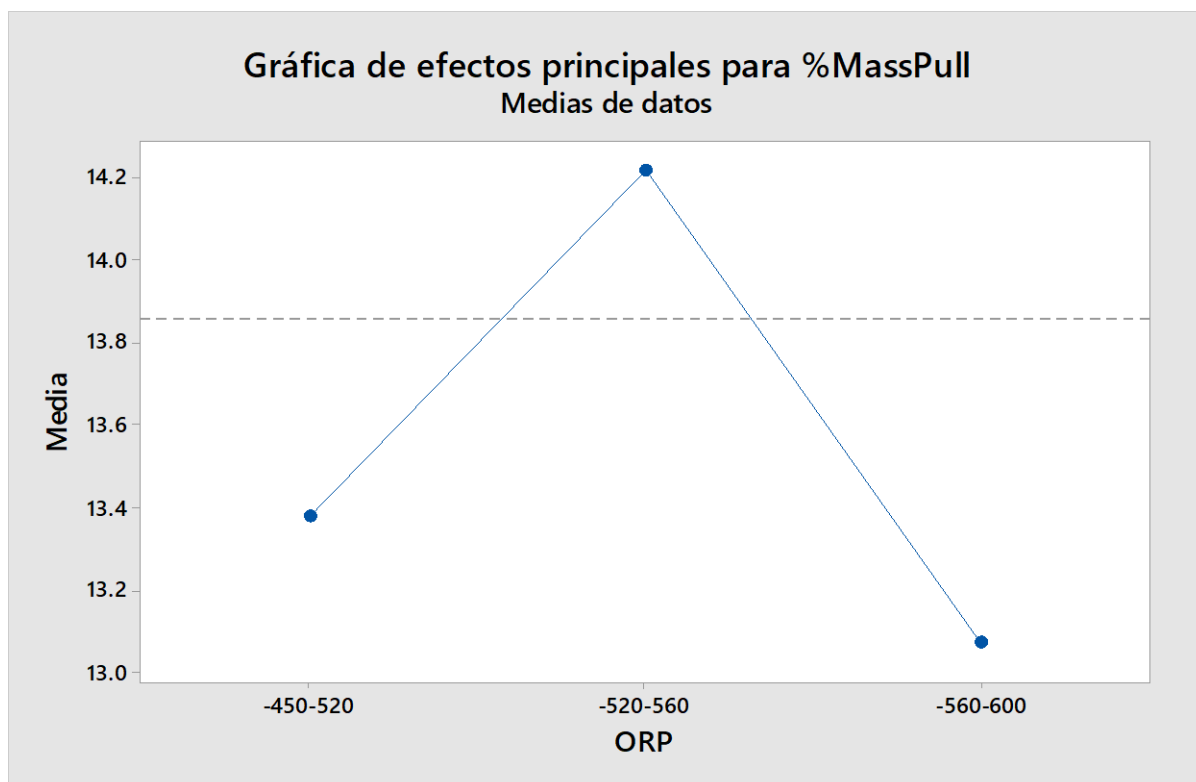


Figura 39. Gráfica de efectos principales del ORP.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Fase Mejorar

Culminado la fase analizar, donde se observó la importancia de tener un buen flujo de alimentación y %sólidos, en la etapa mejorar se decidió hacer la prueba de diseño de experimentos en función a estos 2 parámetros.

Los valores de los límites mínimos y máximos para ejecutar el diseño de experimentos se muestran en la tabla 5, los cuales están en función a lo hallado en la fase analizar en la figura 35.

Tabla 5
Valores mínimos y máximos para el DOE

Variables	Mínimo	Máximo
%Sólidos	30	36
Flujo de alimentación	200	260

Se realizó el diseño de experimentos con 2 réplicas y sin puntos centrales como

consecuencia que los límites hallados no son muy amplios.

Culminado la ejecución de las pruebas se obtuvieron los siguientes resultados. Ver tabla 6

Tabla 6

Resultados del DOE para %Sólidos y flujo de alimentación

Orden Est	Orden Corrida	Pt Central	Bloques	%Sólidos	Flujo Alimentación	%Masspull
1	1	1	1	30	200	24.009
2	2	1	1	36	200	14.276
3	3	1	1	30	260	18.864
4	4	1	1	36	260	8.565
5	5	1	1	30	200	22.482
6	6	1	1	36	200	16.016
7	7	1	1	30	260	25.249
8	8	1	1	36	260	14.311

Conocidos los resultados, estos fueron interpretados de la siguiente manera:

- En la figura 40, se muestran las medias de los valores obtenidos en las 2 réplicas resultando un %masspull de 23.2454%, siendo este el valor más alto, cuando se trabajó con un %sólidos de 30% y un flujo de 200m³/hr. Seguido de un %masspull de 22.0560% al trabajarse con el mismo %sólidos pero con un flujo de 260m³/hr. El siguiente fue un %masspull de 15.1458% cuando se trabajó con un %sólidos de 36% y un flujo de 200m³/hr. Por último, se obtuvo el valor más bajo del %masspull con 11.4378% cuando se trabajó con un %sólidos de 36% y un flujo de 260m³/hr.

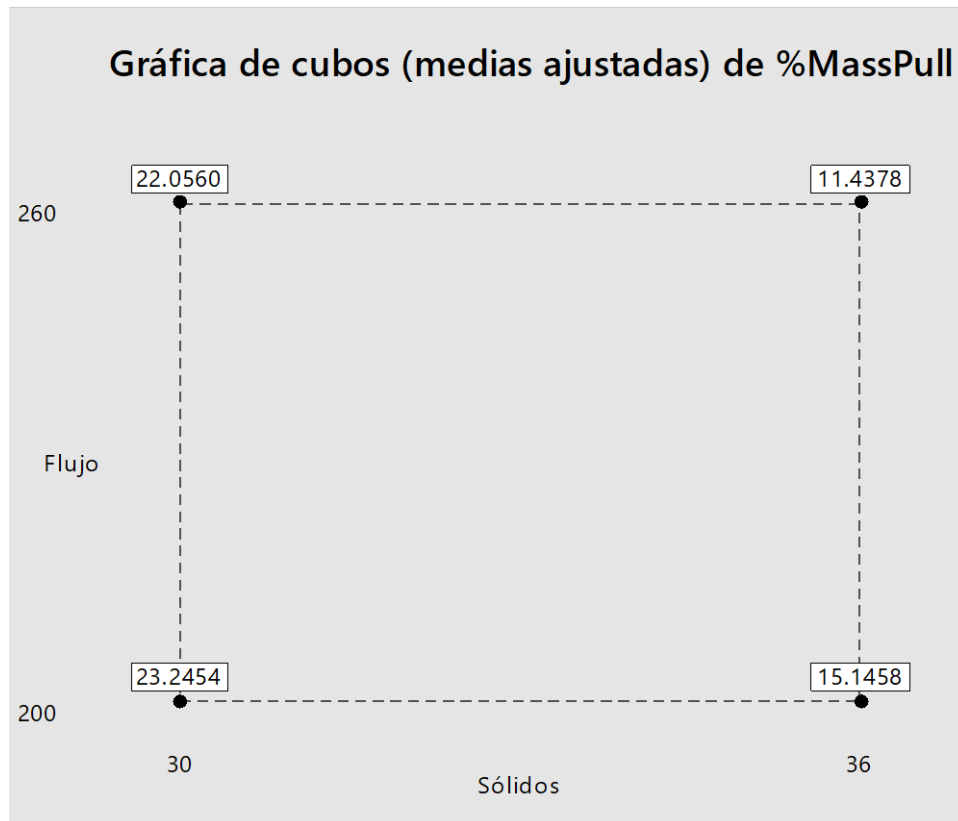


Figura 40. Gráfica de cubos del %masspull

Fuente: Elaboración propia.

- Posteriormente, en la figura 41, cuando se trabajó con un %sólidos de 30% y un flujo de alimentación de 200m³/hr se obtuvo un %masspull superior. Si bien es cierto, estos 2 parámetros influyen en el %masspull, pero fue necesario precisar que el %sólidos es el parámetro que tiene mayor impacto.

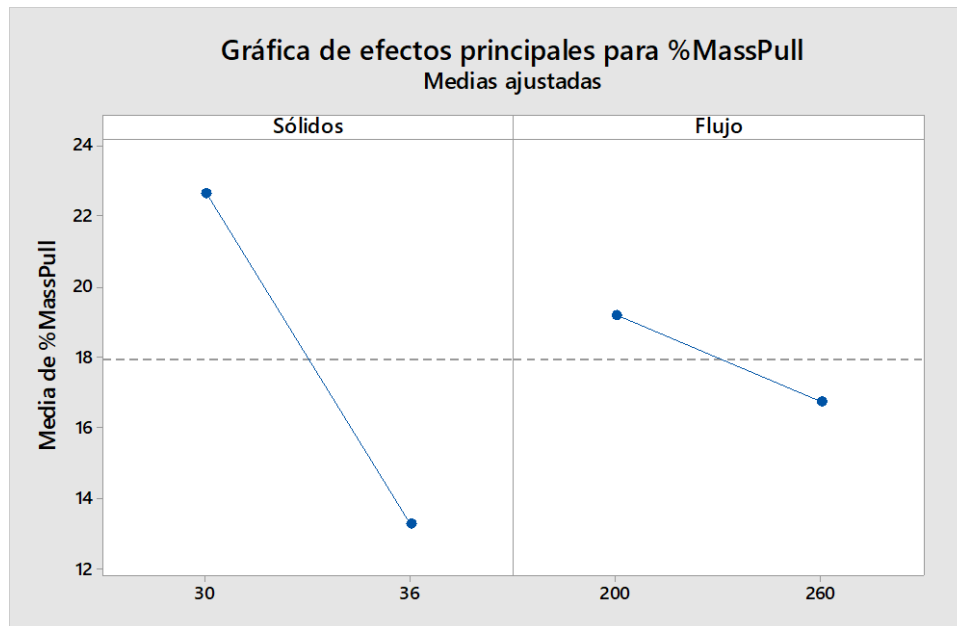


Figura 41. Gráfica de efectos principales del %masspull

Fuente: Elaboración propia.

- Lo dicho anteriormente, se observó mejor en el diagrama de Pareto (figura 42), donde se comprobó que el principal parámetro que afectó el %masspull fue el %sólidos. Por otro lado, el flujo de alimentación y la interacción de estos 2 parámetros tuvieron cierta influencia pero estadísticamente no causaron un efecto significativo en el %masspull.

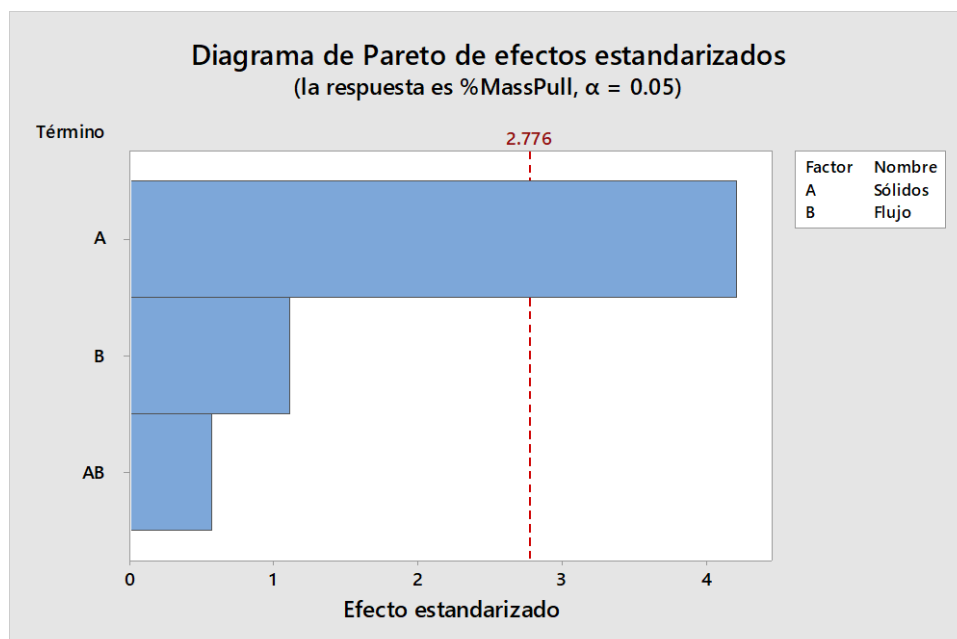


Figura 42. Diagrama de Pareto de %sólidos y flujo de alimentación.

Fuente: Elaboración propia.

- Además, se realizó un análisis estadístico del diseño de experimentos (figura 43), donde también se corroboró que el %sólidos fue el parámetro más importante ya que obtuvo un valor p de 0.014, asegurándose estadísticamente al 95% de confianza. Asimismo, el modelo del DOE tuvo un R-cuadrado ajustado de 69.88% lo cual fue muy bueno, aunque pudo haber aumentado si se hubiera realizado una réplica adicional. Por último, se revisó la independencia de los datos obteniendo un FIV de 1. Se afirmó que la regresión producida por el DOE es estadísticamente significativa.

Regresión factorial: %MassPull vs. Sólidos, Flujo

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	190.341	63.447	6.41	0.052
Lineal	2	187.169	93.585	9.46	0.030
Sólidos	1	175.177	175.177	17.71	0.014
Flujo	1	11.992	11.992	1.21	0.333
Interacciones de 2 términos	1	3.172	3.172	0.32	0.601
Sólidos*Flujo	1	3.172	3.172	0.32	0.601
Error	4	39.571	9.893		
Total	7	229.912			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3.14527	82.79%	69.88%	31.15%

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		17.97	1.11	16.16	0.000	
Sólidos	-9.36	-4.68	1.11	-4.21	0.014	1.00
Flujo	-2.45	-1.22	1.11	-1.10	0.333	1.00
Sólidos*Flujo	-1.26	-0.63	1.11	-0.57	0.601	1.00

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\% \text{MassPull} = 25.7 + 0.05 \text{ Sólidos} + 0.190 \text{ Flujo} - 0.0070 \text{ Sólidos*Flujo}$$

Figura 43. Informe estadístico del DOE.

Fuente: Elaboración propia.

- Por último, en la figura 44, detalló los rangos del %masspull que se obtendría bajo diferentes condiciones del %sólido y flujo de alimentación como consecuencia del

análisis de varianza y del modelo estadístico. Se determinó que mientras más cercano sea el %sólidos a 30% el %masspull aumentará.

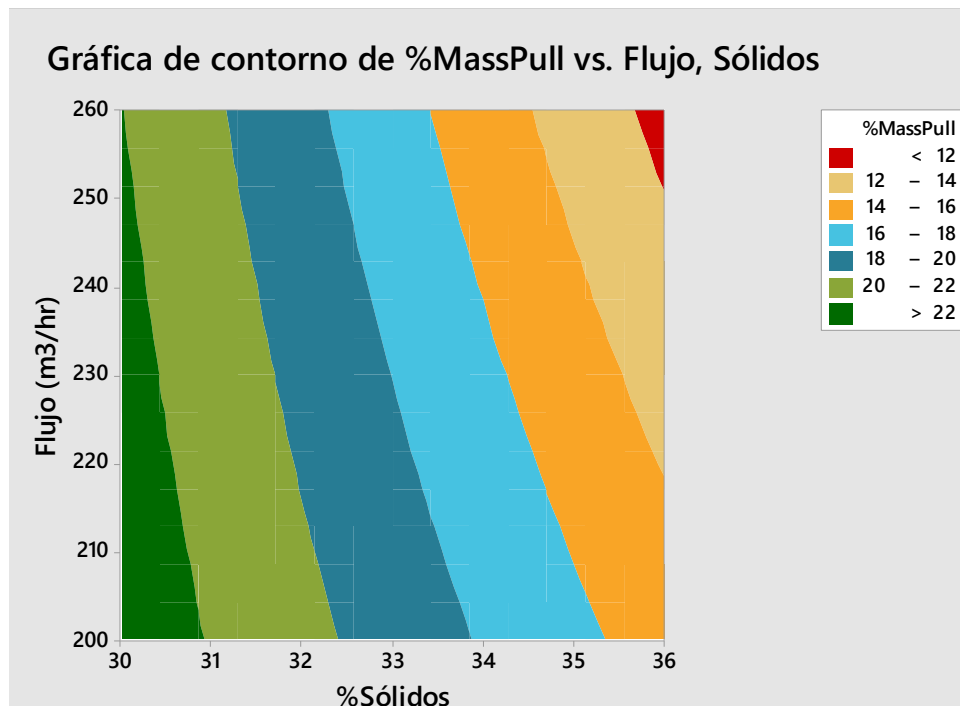


Figura 44. Gráfica de control de %sólidos y flujo de alimentación vs %masspull.

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Fase Controlar

En la última fase del six sigma se priorizó trabajar con un %sólidos de 30% en la etapa rougher y se hizo un seguimiento estricto del comportamiento del %masspull con la mejoras implementadas. Debido a esto, se volvió a medir la capacidad bajo las mismas condiciones iniciales teniendo como especificación inferior un %masspull de 11% con la finalidad de observar el antes y el después del proceso.

Se determinó que luego de implementar las mejoras, el %masspull seguía teniendo una distribución normal con un valor p de 0.253 en la prueba de Anderson – Darling, además en las gráficas I-MR (figura 45), visualmente se detalló el comportamiento del nuevo %masspull, donde este tuvo una menor variabilidad y un aumento en la media. Ver gráfica 45.

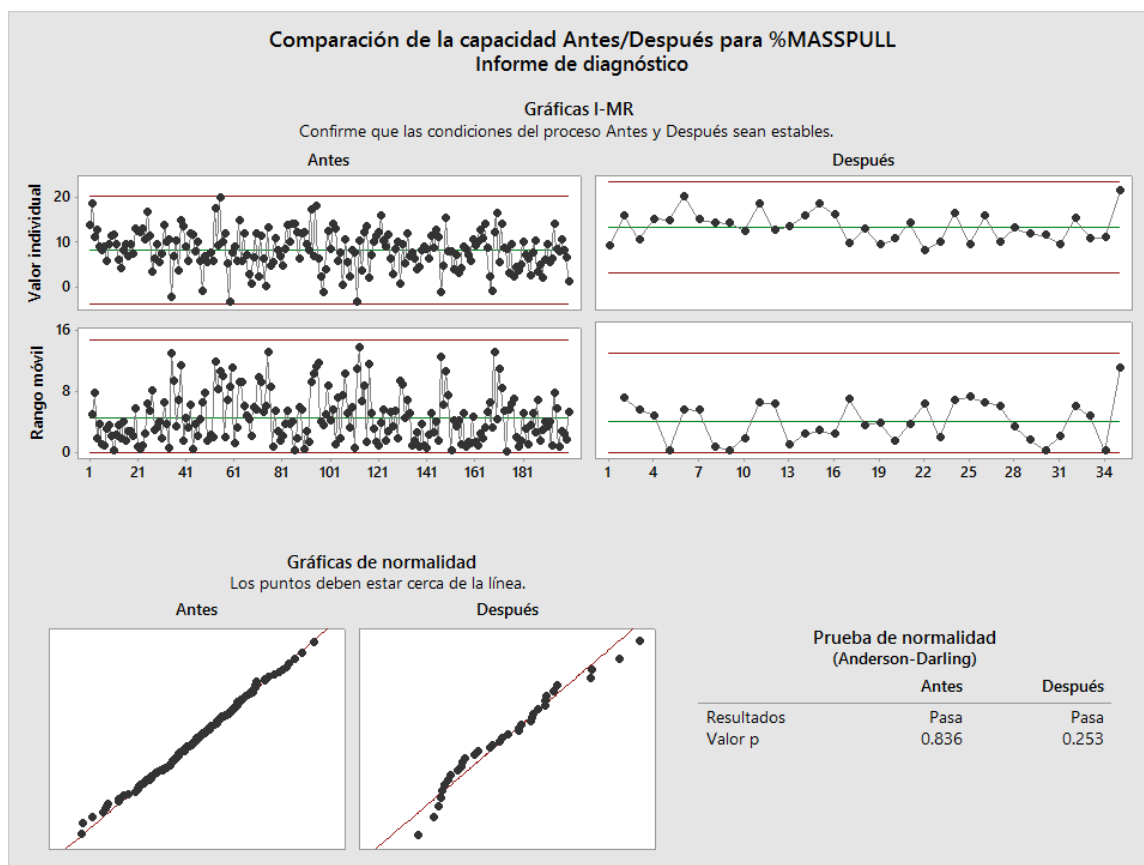


Figura 45. Informe de diagnóstico de comparación de la capacidad antes/después para %masspull.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, los histogramas mostraron un desplazamiento hacia a la derecha, donde la mayoría de los datos se trasladó por encima de la especificación inferior. Numéricamente se redujo en 68% los datos que se encontraban por debajo de la especificación, aunque seguía teniendo un 23.73% de datos por debajo de él. Por otro lado, la media del proceso luego de implementar las mejoras fue de 13.408 aumentando en 5.2274 respecto a la media inicial. Ver figura 46.

En el caso de las desviaciones estándar de corto y largo plazo, hubo una disminución de estas en 0.63269 y 0.95422 respectivamente.

Finalmente, la capacidad o nivel sigma a corto y largo plazo del proceso luego de implementar las mejoras fue de 0.71 y 0.72 respectivamente, aumentando en ambos casos a la capacidad inicial del proceso. Ver figura 47.

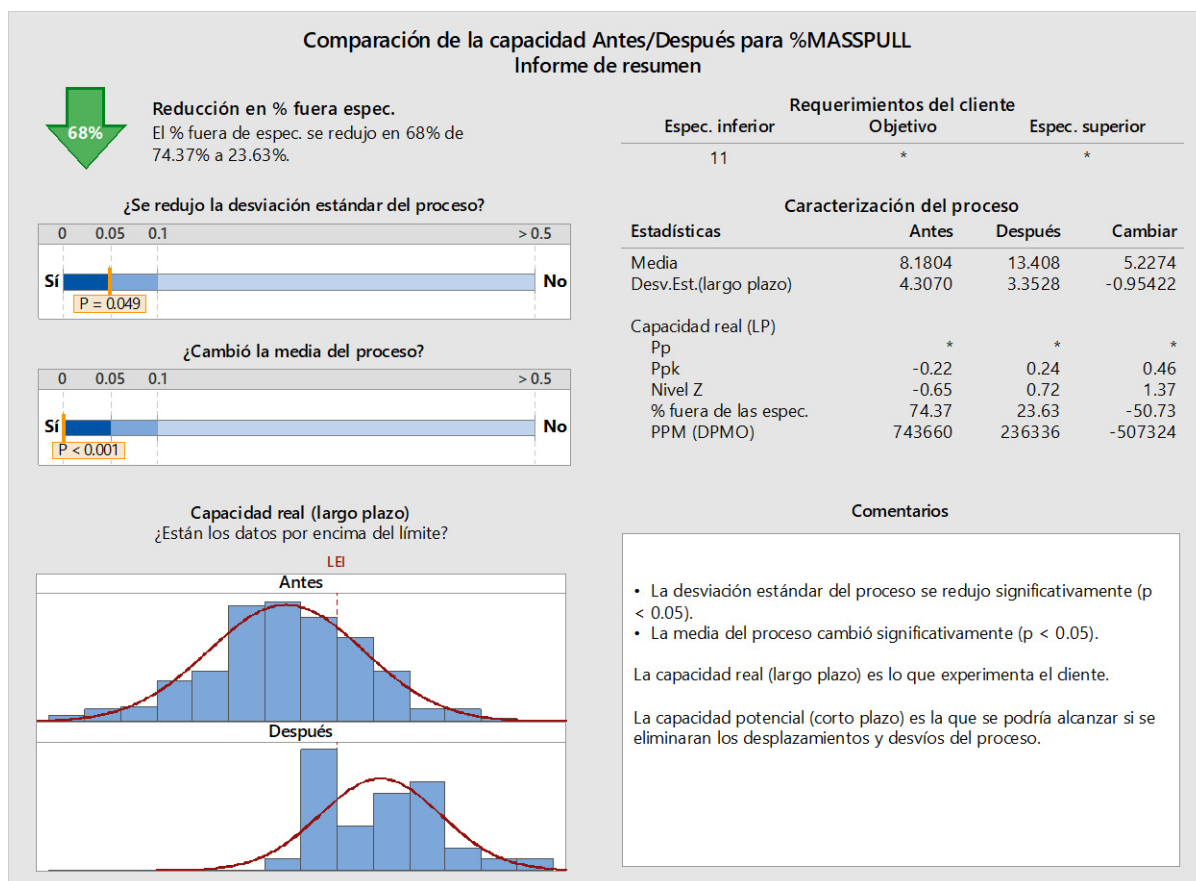


Figura 46. Informe de resumen de comparación de la capacidad antes/después para %masspull.

Fuente: Elaboración propia.

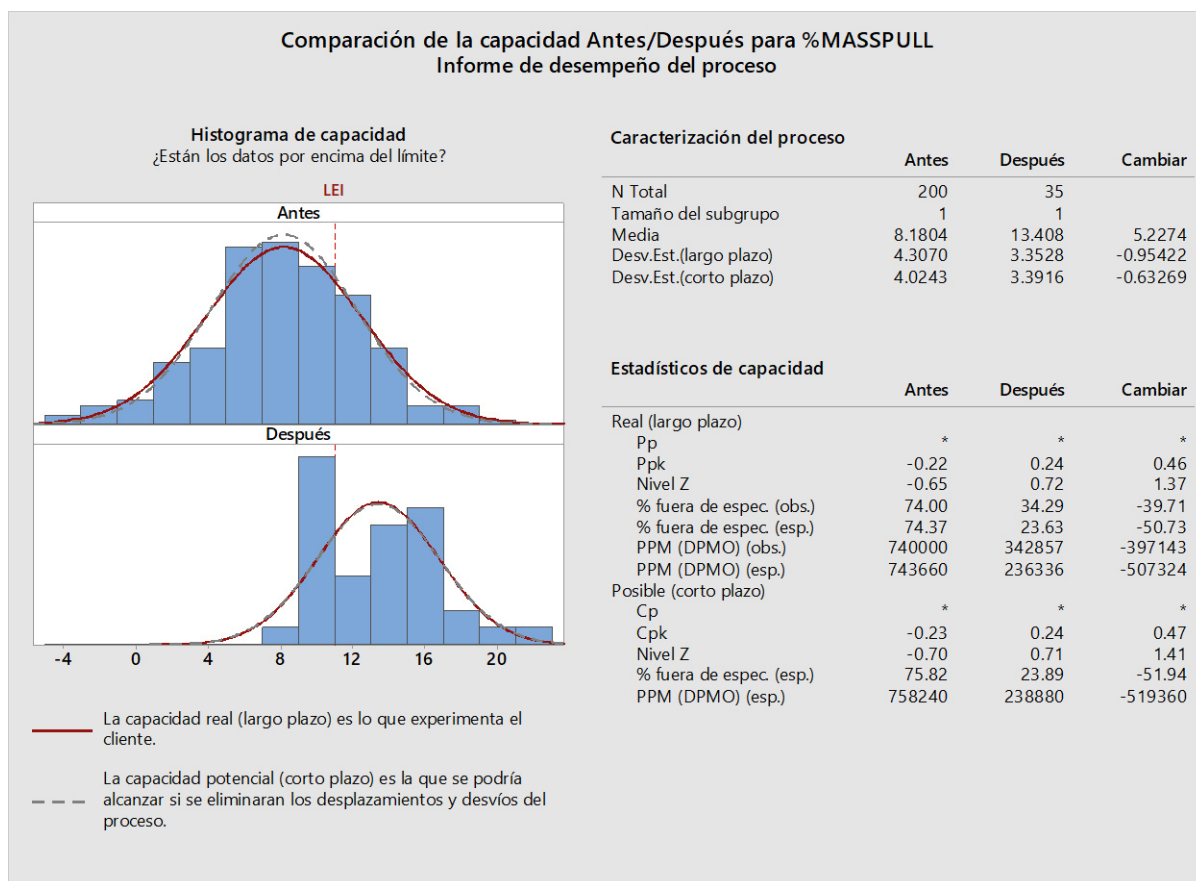


Figura 47. Informe de desempeño del proceso de comparación de la capacidad antes/después para %masspull.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo V: Discusión de Resultados

Los resultados dados en la fase controlar de la metodología Six Sigma mostraron un aumento del %masspull luego de trabajar el %sólidos a 30% en la etapa rougher. Además, el proceso mostró una menor variabilidad y una mejor capacidad en comparación al proceso inicial. Debido al aumento del %masspull, el flúor presente en el concentrado de cobre disminuyó tal como se aprecia en la figura 48.

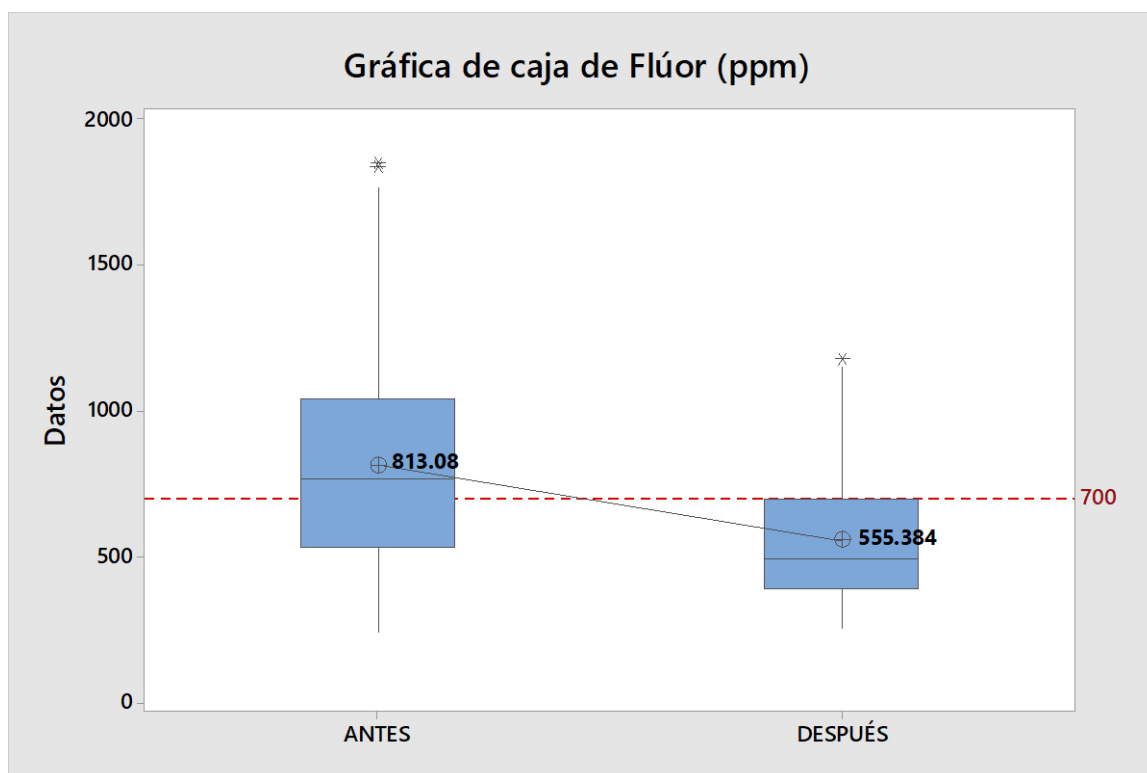


Figura 48. Flúor en el concentrado de cobre antes/después.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado el grado de cobre no muestra un claro aumento o reducción en su media pero sí una disminución en la variabilidad. Ver figura 49.

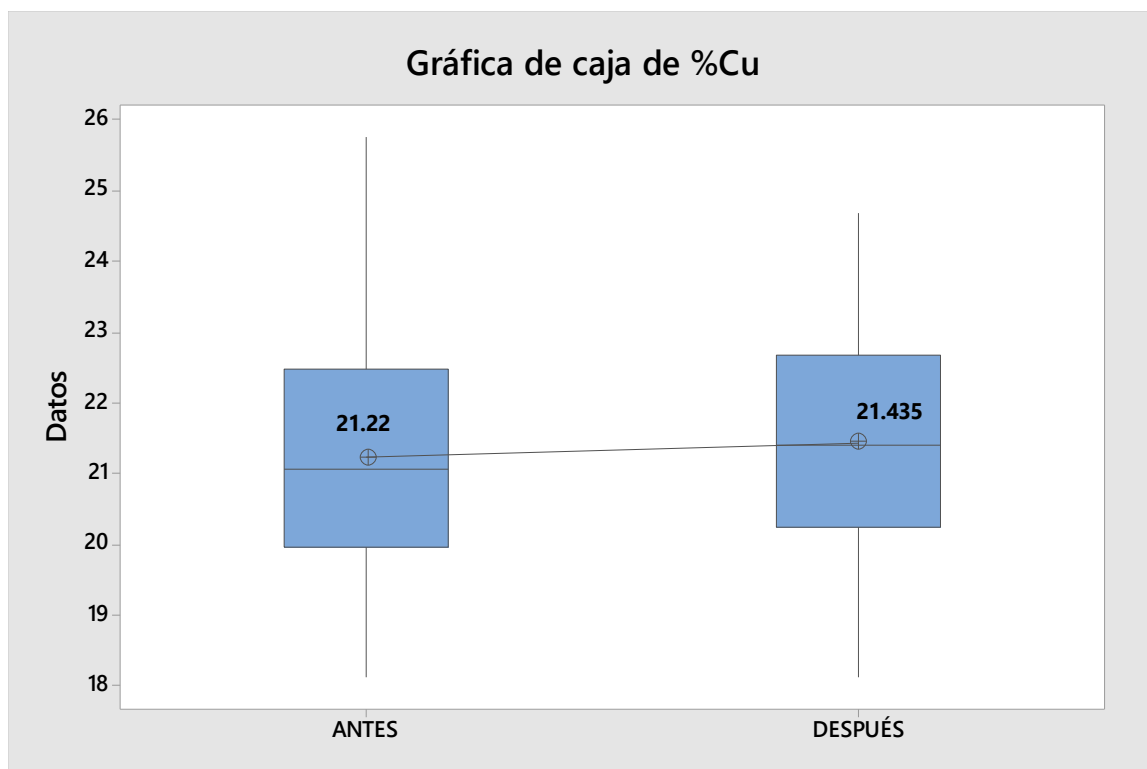


Figura 49. Grado de cobre en el concentrado de cobre antes/después.

Fuente: Elaboración propia.

Mientras tanto, recuperación metalúrgica del proceso muestra un aumento en la variabilidad.

Ver figura 50.

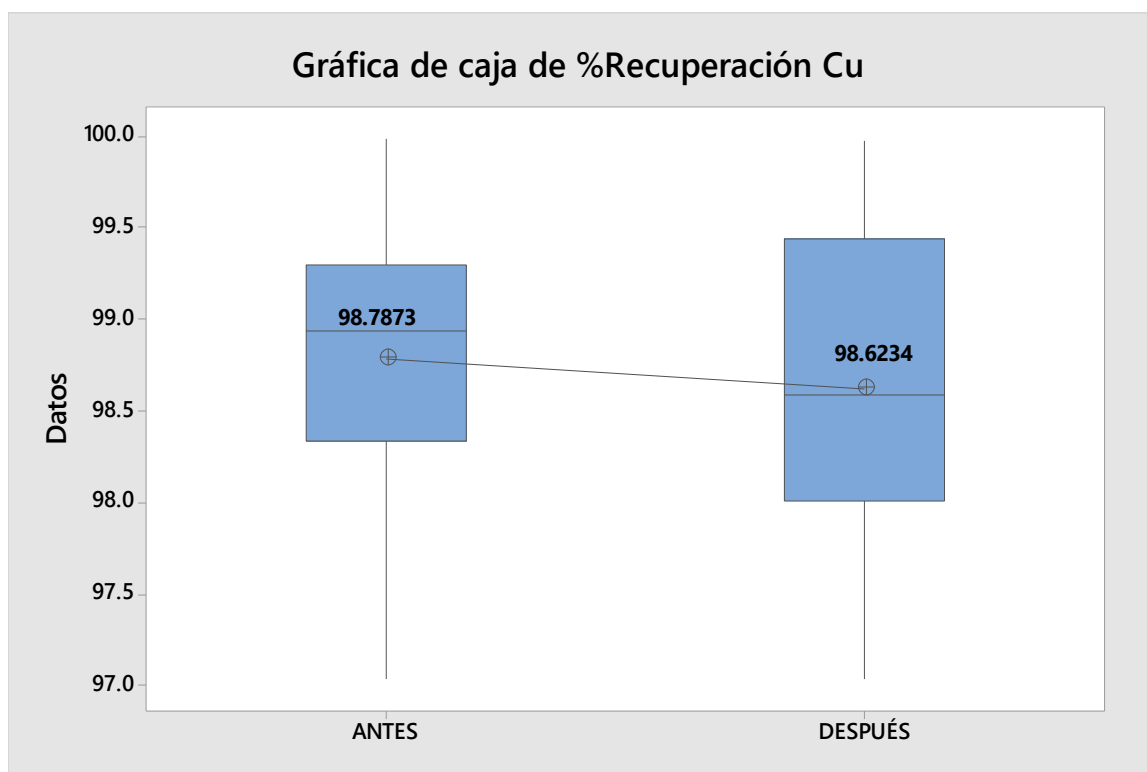


Figura 50. %Recuperación Cu del circuito antes/después.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo VI: Conclusiones

- Existe gran variabilidad del flúor en el concentrado Cu, perjudicando obtener grados altos de Cu sobre todo cuando el flúor llega a 1000 ppm en el concentrado final.
- La capacidad inicial del proceso fue de -0.65 a largo plazo y -0.70 a corto plazo medidas a nivel sigma; resultados muy por debajo de lo esperado lo cual reflejaron la falta de controles adecuados para el proceso.
- La eliminación de flúor es inversamente proporcional al %masspull, esto significa que por lo menos se requiere 11% de masa de insolubles sean retirados para poder alcanzar un contenido de flúor menor a 700ppm en el concentrado cobre.
- La etapa rougher del circuito es la etapa que más impacta al %masspull ya que es donde se produce el concentrado de cobre.
- De los parámetros del proceso, el % de sólidos de la alimentación al circuito es el principal parámetro que origina la variabilidad, obteniéndose mejores resultados al trabajar entre un rango de 30% a 36%.
- Una vez fijado el % de sólidos en el rango establecido y controlado el %masspull, la capacidad del proceso mejoró en 1.37 a largo plazo y 1.41 a corto plazo, obteniéndose valores de flúor en el concentrado menores a 700ppm.
- La metodología del Six Sigma como alternativa a la mejora continua de procesos sin o poca inversión económica. Realizando previamente un análisis de los parámetros que influyen en el proceso, identificando lo más importantes y así darles un mayor control.

Capítulo VII: Recomendaciones

- De los demás parámetros del proceso, el flujo de alimentación se sugiere trabajar entre 200-260 m³/hr, por tal motivo es necesario realizar la evaluación de esta (bomba adecuada, tubería adecuada, etc.).
- Trabajar el colchón de espumas y la abertura de aire en una relación de 1 a 1.4 en las 2 primeras celdas de flotación rougher debido a su impacto de estas. Además es necesaria la evaluación del sistema automático de los dardos (capacidad mínima de flujo); una evaluación por hidrodinámica es factible considerarla.
- Evaluar económicamente el uso de nitrógeno como alternativa del oxígeno. Mientras tanto, trabajar las celdas de flotación con un ORP de -520 a -560 (para evitar que la reacción del NaSH sea reversible).
- No es factible pensar en otro cambio sin antes minimizar más la variabilidad; una vez realizado, es necesario monitorear el grado de cobre que se arrastra, si este es mayor a 3% es necesario otro proyecto adicional.
- Programar mantenimientos preventivos con el área mecánica para una buena disponibilidad de equipos. Así mismo, coordinar con el área de automatización la calibración de flujómetros, potenciometros, densímetros, etc.
- Actualizar las ecuaciones del Courier para tener valores más certeros del %masspull y así un correcto control.

Capítulo VIII: Referencias Bibliográficas

1. Bahena, M. Reyes, P. (2006). Curso de Seis Sigma. Recuperado de <http://www.icicm.com/files/CursoSeisSigma.pdf>
2. Bravo, J. (2008). Gestión de Procesos. Santiago de Chile, Perú: Evolución.
3. Díaz, R. (2008). Mejora De La Recuperación De Molibdeno (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de ingeniería, Lima, Perú.
4. Evans, J.R. Lindsay, W.M. (2008). Administración y control de la calidad. D.F., México: Cengage Learning.
5. Herrera, R. J. Fontalvo, T. J. (2011). Seis Sigma Métodos Estadísticos y Sus Aplicaciones.
Recuperado de http://biblioteca.utec.edu.sv/siab/virtual/elibros_internet/55821.pdf
6. Huerga, C., Abad, J., y Blanco, P. (2012), El papel de la estadística en la metodología seis sigma. Una propuesta de actuación en servicios sanitarios / The key role of statistical methods in Six-Sigma: A proposal of implementation in health care services. Pecvnia, 111-136. Doi: <http://dx.doi.org/10.18002/pec.v0i2012.1109>
7. Goetsch, D.L. DAVIS, S.B. (2006). Quality Management. Nueva York, Estados Unidos: Prentice Hall.

8. Gutiérrez, H. De la Vara, R. (2013). Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma. Mc Graw Hill.
9. Knowles, G. (2011). Six Sigma. Recuperado de <http://www.bookboon.com>
10. López, M. (2017). Implementación de TLS para mejorar la productividad en la planta de procesos de la Corporación Miyasato S.A.C. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
11. Mallqui, L. (2018). Aplicación de la metodología Six Sigma para reducir la merma de Scrap en el proceso de fabricación de sacos de polipropileno (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
12. Measurement Systems Analysis Work Group (2010), Measurement systems analysis reference manual. Recuperado de http://www.rubymetrology.com/add_help_doc/MSA_Reference_Manual_4th_Edition.pdf
13. Ministerio de Fomento de España. (2005). La gestión por procesos. Recuperado de <https://www.fomento.es>
14. Montgomery, D. C. (2004). Diseño y análisis de experimentos. D.F., México: Limusa.

15. Navarro, F. (2016, 15 de julio). La Gestión de la Calidad Total (TQM), RevistaDigital. Recuperado de <https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/la-gestion-de-la-calidad-total-tqm/>
16. Tejada, M. (2016). Aplicación de la metodología Six Sigma para la mejora de la productividad en el proceso de filtrado de concentrado en la Compañía Minera Antamina Huaráz-Perú 2016 (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
17. Verdoy, P.J. Mahiques, J.M. Pellicer, S.S. Prades, R.S (2006). Manual de Control Estadístico de Calidad: Teoría y Aplicaciones. Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume I

ANEXOS

Balance de Masa del Proceso:

